



№5-2021

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Моделирование процессов и систем
- Алгоритмы обработки информации

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

№ 5 (222). 2021 г.

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

Редакционный совет

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

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Самойлов А.Н.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 28.12.2021 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 16,9. Уч.-изд. л. – 12,7.

Заказ № 8312. Тираж 250 экз.

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

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

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

А.Р.Д. Алалван, Н.А.М. Шаммари, Д.А. Мищенко, М.С. Светлов, А.А. Львов ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ДАТЧИКОВ.....	6
В.П. Асовский, А.С. Кузьменко КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ОПРЫСКИВАНИЯ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ АВИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИХ РАБОТ	20
Д.В. Беляев, Д.Е. Губарев, К.Е. Румянцев СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА С ОСЦИЛЛЯЦИЯМИ НА ВЕРШИНЕ МНОГОПороГОВЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЯМИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ	29
А.И. Комиссаров, К.Е. Бяков, В.Б. Холоденко, О.А. Корниенко РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФИЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ДВУХЗВЕННОГО ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА.....	39
Д.А. Мищенко, А.А. Львов, Светлов М.С., А.А. Никифоров, А.Р.Д. Алалван ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ	49
И.В. Родыгина, В.А. Новак МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ MESH-СЕТЬ НА ОСНОВЕ СПЕЦИФИКАЦИИ ZIGBEE.....	60
М.Е. Дробынин, О.Д.М. Аль-Таи, Е.В. Филина, П.А. Львов, С.А. Кузин КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В АВИАЦИОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ	69
А.Л. Ляшенко РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА	83
Н.Н. Грачева, В.Н. Литвинов, А.В. Никитина, Н.Б. Руденко, А.Е. Чистяков ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ СЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ НА ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ	93
И.Б. Сафроненкова, А.Б. Клименко ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В ГРУППЕ БПЛА.....	105

РАЗДЕЛ II. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Л.К. Бабенко, А.С. Шумилин, Д.М. Алексеев АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБЛАЧНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	120
С.М. Гушанский, В.Н. Пуховский, В.С. Потапов РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ДЕКОДЕРА ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КОДОВ СТАБИЛИЗАТОРА.....	134
В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗОВ.....	146

С.А. Дудко, И.И. Левин МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	154
Н.К. Жуков, В.А. Мордвинов, А.А. Русяков МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ В НОРМИРОВАНИИ И ГАРМОНИЗАЦИИ КОНТЕНТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....	168
О.Б. Лебедев, А.А. Жиглатый, Е.О. Лебедева РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ПОИСКОВОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ СБИС	176

CONTENT

SECTION I. MODELING OF PROCESSES AND SYSTEMS

A.R.J. Alalvan, N.A.M. Shammari, D.A. Mischenko, M.S. Svetlov, A.A. L'vov STUDY OF RETRANSMISSION SCHEMES IN WIRELESS SENSOR NET WORKS	6
V.P. Asovsky, A.S. Kuzmenko COMPUTER SIMULATION OF AVIATION SPRAYING WHEN IMPROVING THE TECHNOLOGY OF AERIAL-CHEMICAL WORKS	20
D.V. Belyaev, D.E. Gubarev, K.E. Rumyantsev RANDOM ERROR OF PULSE DURATION MEASUREMENT WITH OSCILLATIONS AT THE TOP BY MULTI-THRESHOLD DURATION METERS	30
A.I. Komissarov, K.E. Byakov, V.B. Kholodenko, O.A. Kornienko DEVELOPMENT OF THE MULTIBODY MODEL OF A TWO-UNIT IN-PIPE ROBOT FOR EVALUATION OF ITS CAPABILITY TO MOVE THROUGH A PIPELINE	40
D.A. Mishchenko, A.A. L'vov, M.S. Svetlov, A.A. Nikiforov, A.R.J. Alalvan SEMI-MARKOV MODEL OF TELECOMMUNICATION NETWORK WITH DYNAMIC CONTROL	50
I.V. Rodygina, V.A. Novak SIMULATION OF WIRELESS MESH NETWORK BASED ON ZIGBEE SPECIFICATION	60
M.E. Drobnyin, O.D.M. Al-Tai, E.V. Filina, P.A. L'vov, S.A. Kuzin TEMPERATURE EFFECT COMPENSATION IN AVIATION PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS	69
A.L. Liashenko DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM OF THERMAL PROCESSES IN A HYDRAULIC PRESS	84
N.N. Gracheva, V.N. Litvinov, A.V. Nikitina, N.B. Rudenko, A.E. Chistyakov COMPUTATIONAL ASPECTS OF SOLVING GRID EQUATIONS ON GRAPHICS ACCELERATORS	94
I.B. Safronenkova, A.B. Klimenko THE ESTIMATION OF CHANGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS INFLUENCE ON THE WORKLOAD DISTRIBUTION IN THE UAV GROUP	106

SECTION II. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

L.K. Babenko, A.S. Shumilin, D.M. Alekseev ALGORITHM OF PROTECTING CONFIDENTIAL DATA IN THE CLOUD MEDICAL INFORMATION SYSTEM	120
S.M. Gushanskiy, V.N. Pukhovskiy, V.S. Potapov IMPLEMENTATION OF A PROBABLE DEEP NEURAL NETWORK DECODER FOR STABILIZER CODES	135
V.V. Kovalev, N.E. Sergeev ALGORITHM FOR PRE-PROCESSING VIDEO IMAGES TO INCREASE THE ACCURACY OF SMALL OBJECT DETECTION	146
S.A. Dudko, I.I. Levin TRANSFORMATION METHODS OF COMPUTING STRUCTURE WITH FEEDBACKS FOR EFFECTIVE IMPLEMENTATION ON RECONFIGURABLE COMPUTING SYSTEMS	154

N.K. Zhukov, V.A. Mordvinov, A.A. Ruslyakov	
THE MODIFICATION OF THE IDEAL POINT METHOD IN THE NORMALIZATION AND HARMONIZATION OF CONTENT IN INFORMATION SYSTEMS.....	169
O.B. Lebedev, A.A. Zhiglatiy, E.O. Lebedeva	
DEVELOPMENT OF MODIFIED METHODS AND MODELS OF SEARCH ADAPTATION FOR SOLVING THE PROBLEM OF PLANNING VLSI.....	177

Раздел I. Моделирование процессов и систем

УДК 004.738:621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-6-19

**А.Р.Д. Алалван, Н.А.М. Шаммари, Д.А. Мищенко,
М.С. Светлов, А.А. Львов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ДАТЧИКОВ

Беспроводные сети датчиков (БСД) активно внедряются в различных системах дистанционного наблюдения и мониторинга распределенных объектов. БСД обладают целым рядом несомненных достоинств: гибкость, эффективность, относительная дешевизна и возможность быстрого развертывания. Однако обмен информацией и данными производится в БСД с помощью беспроводных каналов связи, подверженных воздействию, как правило, неконтролируемых помех, вызывающих ошибки передачи и даже потерю передаваемых пакетов данных, что представляет собой одну из главных проблем обеспечения надежности БСД. Другой не до конца решенной проблемой является неравномерное распределение потребляемой энергии внутри БСД в условиях жестких ограничений и требований к источникам энергии. В настоящее время для предотвращения потерь передаваемых данных более широко используются две схемы повторной передачи информации – пошаговая и сквозная. Большинство известных исследований, посвященных вопросам надежной передачи данных в БСД с использованием этих схем, выполнено экспериментальным путем. Кроме того, до сих пор отсутствуют аналитические методы оценки различных надежных транспортных решений, что затрудняет анализ предлагаемых БСД. Поэтому цель настоящей работы – синтез аналитических методов и алгоритмов исследования рабочих характеристик ретрансляционных схем сигналов в БСД. Предлагаются аналитические методы оценки схем повторной передачи в БСД, основанные на относительно новой теоретической базе – сетевом исчислении для сетей с коммутацией пакетов, представляющем собой инструмент определения размеров сети. Сначала вводятся модели трафика, обслуживания и затрат энергии. На основе этих моделей и сетевых расчетов осуществляются аналитические оценки максимальной задержки времени передачи пакетов и энергоэффективности пошаговой и сквозной повторной передач. По результатам эксперимента сравниваются в нескольких сценариях максимальная задержка и наибольшее энергопотребление этих двух схем. Кроме того, максимальная задержка, вычисленная аналитически, сравнивается с результатами моделирования. С помощью предлагаемого метода можно выбрать подходящую схему повторной передачи на основе различных устанавливаемых требований и ограничений.

Беспроводные сети датчиков; повторная передача пакета; сетевое исчисление; кривая прибытия; кривая обслуживания.

A.R.J. Alalvan, N.A.M. Shammari, D.A. Mischenko, M.S. Svetlov, A.A. L'vov

STUDY OF RETRANSMISSION SCHEMES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Wireless sensor networks (WSNs) are being actively implemented in various systems for remote observation and monitoring of distributed objects. WSNs have a number of undoubted advantages: flexibility, efficiency, relative cheapness, and the possibility of rapid deployment. However, the exchange of information and data is carried out in the WSN using wireless communication channels, which are subject to inevitable interference and noise, which leads to transmission

errors and even to the loss of transmitted data packets. Another challenge, not fully resolved, is the uneven distribution of consumed energy within the WSN in the face of stringent requirements for energy sources. Currently, there are two most widely used retransmission schemes in the loss of transmitted data, namely, hop-by-hop and end-to-end. Most of the well-known studies devoted to the issues of reliable data transmission in WSN using these schemes have been carried out experimentally. In addition, there are still no analytical methods for evaluating various reliable transport solutions, which complicates the analysis of the proposed WSN. Therefore, the aim of the proposed work is the development of analytical methods and algorithms for studying the operating characteristics of the signal relaying circuits in the WSN. Analytical methods are proposed for evaluating retransmission schemes in the WSN, based on a relatively new theoretical basis - the network calculus for packet-switched networks, which is a tool for determining the size of the network. First, traffic, service and energy cost models are introduced. Based on these models and network calculations, the maximum packet transmission delay and energy efficiency of the two main types of retransmission schemes: hop-by-hop and end-to-end retransmission, are analytically estimated. According to the results of the experiment, the maximum latency and the maximum power consumption of these two schemes are compared in several scenarios. In addition, the analytically calculated maximum delay is compared with the simulation results. With the proposed method, a suitable retransmission scheme can be selected based on the various requirements and constraints to be set.

Wireless sensor networks; packet retransmission; network calculation; arrival curve; service curve.

Введение. В последнее десятилетие в повседневную практику все активнее внедряются беспроводные сети датчиков (БСД – *Wireless Sensor Networks*) [1–5], наилучшим образом реализующие мониторинг распределенных объектов. Гибкость, эффективность, относительная дешевизна и возможность быстрого развертывания БСД обеспечивают использование новых приложений дистанционного контроля различных объектов и процессов, в том числе находящихся в опасных для людей или недоступных средах.

Традиционной архитектурой таких распределенных датчиков, объединяемых в единую совместную сеть, является многоузловая сеть с беспроводными каналами связи (БПКС), обычно с радиоканалами связи [6–8], работающими в условиях неконтролируемых изменений их состояний, в первую очередь, из-за влияния внешней среды. Кроме того, в процессе функционирования сети изменяются и внутренние параметры БПКС. В общем случае можно говорить, что передача информации в БСД происходит по БПКС с помехами, что приводит к возникновению ошибок передачи в результате наложения во времени передаваемых информационных пакетов и сигналов помех [3–5, 7, 8]. При этом наиболее критичной является возможная потеря пакетов.

Причинами потери информационных пакетов могут быть случайные сбои в работе того или иного узла, приводящие к произвольному отключению соответствующего датчика. Такие сбои возможны не только как результат ненадежности (отказов) программно-аппаратных средств конкретных узлов [7–10], но и как следствие неравномерного распределения потребляемой ими энергии в условиях жестких требований по энергетике. Эти поврежденные узлы часто образуют общую поврежденную область, которая препятствует нормальной работе БСД, приводя к потере пакетов.

Появление скоростного и непрерывно функционирующего интернета вещей (ИВ), в свою очередь, привело к созданию большого числа разнообразных беспроводных сетей и сенсорных устройств, которые используются для мониторинга и управления многими инфраструктурами. Проведенный анализ [8–10] показывает, что, несмотря на достигнутый определенный прогресс в области проектирования и разработки компонентов БСД для ИВ, все еще значителен круг стоящих перед разработчиками проблем, требующих своего оперативного решения.

Относительно невысокая надежность БПКС, в том числе из-за воздействия помех и окружающей среды в целом, а также из-за возникающих в радиоканале затуханий и замираний сигнала требуют решения целого комплекса задач обеспечения высокой надежности БСД. Большинство известных работ, посвященных вопросам надежной передачи данных в БСД, выполнено экспериментальным путем, поэтому до сих пор отсутствуют обоснованные аналитические методы оценки различных надежных транспортных решений, что затрудняет анализ предлагаемых БСД.

Все сказанное определяет цель настоящего исследования, состоящую в разработке аналитических методов и алгоритмов оценки рабочих характеристик схем ретрансляции в БСД.

В предлагаемой работе предложены аналитические методы оценки схем передачи данных в БСД, разработаны математические модели трафика, обслуживания и потребления энергии в БСД. На основе этих моделей рассчитаны характеристики их функционирования.

1. Обзор методов оценки характеристик ретрансляционных схем в беспроводных сетях. С развитием беспроводной связи и микроэлектроники развертывание БСД стала многообещающей технологией с множеством приложений, таких как удаленный помощник пациента, структурный мониторинг, наблюдение в военных целях, ИВ и т.д. [1–11, 10, 13, 14]. Для многих приложений фундаментальной проблемой является обеспечение эффективной и надежной сквозной передачи пакетов [10, 15].

Одним из наиболее распространенных подходов к повышению надежности передачи является повторная передача [10, 15–17]. В частности, в работе [15] авторы предлагают масштабируемую структуру для надежной доставки данных в нисходящем направлении с использованием импульсного сигнала ожидания первого пакета (*Wait-for-First-Packet*, WFP). В статье [16] предложен надежный транспортный протокол под названием PSFQ (*Pump Slowly and Fetch Fastly*). В этих работах реализованы типичные примеры использования пошаговой повторной передачи пакетов. В работе [17] делается попытка представить механизм адаптивной повторной передачи, который позволяет центру сбора данных выбирать датчики для повторной передачи их локальной информации в соответствии с надежностью полученной информации. Этот протокол относится к сквозной ретрансляции.

В последнее время для сетей с коммутацией пакетов было разработано сетевое исчисление как инструмент определения размеров сети [18]. В работе [19] авторы расширили эту концепцию для анализа времени задержки и предельной загрузки в сетях датчиков. Подобная процедура была названа исчислением сетей датчиков. В статье [20] предложена методология моделирования и определения размеров сетей датчиков для наихудшего случая, представляющих собой кластеры с топологией дерева. В [21] теоретические результаты расчета сети датчиков подтверждены моделированием реалистичных сценариев развертывания БСД.

В [22] авторы исследовали роль повторной передачи пакетов в случае восстановления ошибок кодирования со стиранием для надежной передачи данных в БСД путем разработки соответствующих вероятностных моделей.

В настоящей работе также используется теория сетевого исчисления для анализа максимальной временной задержки схем повторной передачи, а также, как было сказано выше, предлагаются аналитические методы оценки схем повторной передачи в БСД.

2. Модели системы

2.1. Модель трафика и модель обслуживания. В сетях датчиков сенсорный узел определяет свое окружение и генерирует входной поток трафика. Чтобы охарактеризовать этот процесс, моделируется входной поток в узле, описывающий

его совокупный трафик $F(t)$ как количество битов, поступающих в поток в течение интервала времени $[0, t]$. Кроме того, используется некоторая неубывающая функция $\alpha(t)$, ограничивающая этот совокупный поток трафика $F(t)$, который определяется следующим образом. Поток $F(t)$ ограничивается функцией $\alpha(t)$, если и только если для любого $s < t$ выполняется неравенство:

$$F(t) - F(s) \leq \alpha(t-s), \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – так называемая *кривая прибытия* входного потока $F(t)$ [18]. *Аффинная кривая прибытия* – одна из наиболее часто используемых кривых прибытия, которая задействована во многих исследованиях [19, 20, 23]. В предлагаемой работе также используется аффинная кривая прибытия для моделирования трафика, генерируемого исходными узлами, который определяется как сумма $\alpha(t) = \rho t + \sigma$, где ρ и σ представляют собой допуск на пакетную передачу (в битах) и среднюю скорость передачи данных (в бит/с), соответственно. На рис. 1,а показаны примеры периодического кумулятивного потока $F(t)$ и аффинной кривой прибытия $\alpha(t)$.

Кривая обслуживания абстрагируется для моделирования возможностей обработки ресурсов, предоставляемых узлом в сетях с коммутацией пакетов [18]. В БСД это в основном зависит от характеристик канального уровня, таких как скорость передачи данных и способ планирования пакетов. Чтобы свести к минимуму потребление энергии, работа датчиков координируется синхронизированным методом с разделением по времени, когда датчики периодически «засыпают» (находятся в режиме ожидания) и «пробуждаются» по мере надобности [10]. Только узлы, участвующие в передаче или приеме, остаются активными, а другие пребывают в состоянии сна. Эти характеристики канального уровня могут быть смоделированы кривой обслуживания в координатах «скорость–время ожидания» [18], т.е.:

$$\beta(t) = C \frac{S}{T} [t - (T - S)]^+, \quad (2)$$

где T – длина передаваемого фрейма; S – длина слота, назначенного каналу; C – емкость канала. На этой кривой обслуживания отношение CS/T – средняя скорость обслуживания, которая описывает среднюю скорость передачи, а разность $(T - S)$ – максимальная задержка времени обслуживания, которая состоит из времени задержки постановки в очередь и времени пребывания в состоянии сна. Оператор $[x]^+$ задается следующим образом:

$$[x]^+ = \begin{cases} x & \text{при } x > 0; \\ 0 & \text{при } x \leq 0. \end{cases}$$

Пример кривой обслуживания $\beta(t)$ показан на рис. 1, б.

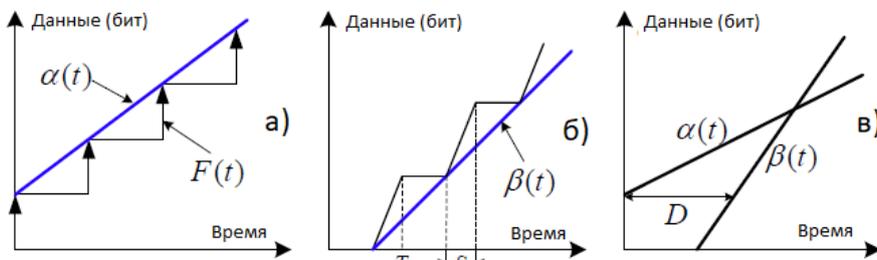


Рис. 1. Кривая прибытия $\alpha(t)$ – а); кривая обслуживания $\beta(t)$ – б); максимальная задержка D – в)

С помощью определений и свойств кривых прибытия и обслуживания можно вывести следующие теоремы на основе теории сетевого исчисления. Подробные описания и доказательства этих теорем даны в [18].

Теорема 1. Максимальная задержка. Предположим, что поток трафика $F(t)$, ограниченный кривой прибытия $\alpha(t)$, проходит через систему передачи данных, которая обеспечивает кривую обслуживания $\beta(t)$. В любой момент времени t виртуальная задержка $D(t)$ удовлетворяет соотношению:

$$D(t) \leq \sup_{t \geq 0} \inf_{\tau \geq 0} [\alpha(t) \leq \beta(t + \tau)] \quad (3)$$

Данная граница определяет максимальное время, на которое может быть задержан бит, прибывающий в систему в момент времени t . На графике верхняя граница задержки – это максимальное горизонтальное отклонение D между $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ (рис. 1, в).

Теорема 2. Граница выхода. Предположим, что поток трафика $F(t)$, ограниченный кривой прибытия $\alpha(t)$, проходит через систему передачи данных, которая обеспечивает кривую обслуживания $\beta(t)$. Тогда выходной поток ограничен следующей кривой прибытия:

$$\alpha^*(t) \leq \sup_{s \geq 0} \{\alpha(t + s) \leq \beta(s)\} \quad (4)$$

Теорема 3. Конкатенация. Предположим, что поток последовательно проходит через две системы передачи данных, которые обеспечивают кривые обслуживания β_1 и β_2 , соответственно. В этом случае объединение (конкатенация) этих двух систем обеспечивает потоку кривую обслуживания $\beta(t)$, которая определяется как:

$$\beta(t) = (\beta_1 \otimes \beta_2) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{\beta_1(t - s) + \beta_2(s)\} \quad (5)$$

где оператор \otimes представляет «мини-плюс» свертку (ее определение можно найти в [18]). Если β_1 и β_2 являются кривыми обслуживания в координатах «скорость–время ожидания», т.е. $\beta_1(t) = R_1[t - T_1]^+$ и $\beta_2(t) = R_2[t - T_2]^+$, то $\beta_1 \otimes \beta_2 = R^*[t - T^*]^+$, где $R^* = \min(R_1, R_2)$ и $T^* = T_1 + T_2$.

2.2. Энергетическая модель. Следуя энергетической модели, предложенной в [24], аналогичным образом представляется потребление энергии при передаче пакетов между двумя узлами:

$$E = 2E_{start} + L(P_{tx} + P_{rx} + 2P_{cir} + P_{amp})/R, \quad (6)$$

где E_{start} представляет собой энергию для запуска передачи данных по радиоканалу; P_{tx} и P_{rx} – энергопотребление радиопередатчика в режиме передачи и приема, соответственно; P_{cir} – потребляемая мощность электронной схемы узла БСД; L – длина пакета в битах; R – скорость передачи данных; $P_{amp} = cdn/p_b$ – потребление энергии усилителем мощности, которое в основном определяется расстоянием d , на которое ведется передача, и коэффициентом ошибок по битам (BER) p_b ; c – постоянная величина, зависящая от затухания в канале и нелинейного эффекта усилителя мощности; n – показатель вероятных потерь. Энергопотребление в спящем режиме игнорируется, поскольку оно намного меньше, чем при передаче или приеме пакетов [25]. Модель (6), может быть расширена, если в нее включить потребление энергии в спящем режиме.

3. Анализ схем передачи. По разработке схем повторной передачи в БСД опубликовано достаточно много работ [10, 15, 17]. Все схемы повторной передачи, как указывалось выше, можно разделить на две основные модификации – пошаговую (*Hop-by-Hop*) и сквозную (*End-to-End*) повторные передачи (рис. 2).

Исходно предполагается, что существует многозвенный путь с n переходами между исходным узлом S и узлом назначения D и что существует механизм автоматического запроса на повторную передачу (*Automatic Repeat Request*), работающий до тех пор, пока пакет не будет успешно доставлен получателю. Пакет не принимается, пока какой-либо бит пакета получен с ошибкой (для систем без использования корректирующих кодов с исправлением ошибок).

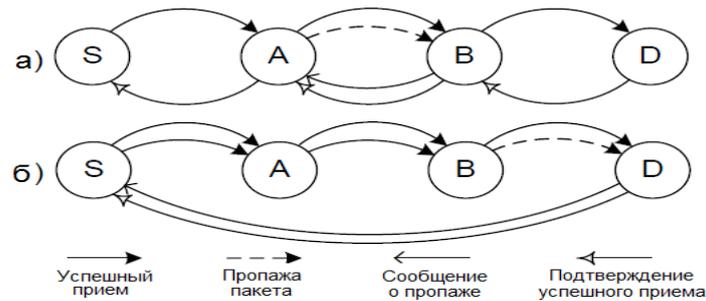


Рис. 2. Механизмы повторной передачи: а) пошаговая повторная передача (*Hop-by-Hop*); б) сквозная повторная передача (*End-to-End*)

Кроме того, предполагается наличие идеального протокола MAC (*Multiple Access Control*) [10], в котором не учитываются помехи и коллизии, поэтому считается, что сбои при доставке пакетов происходят только из-за ошибок, возникающих в канале передачи. Относительную частоту p_e ошибки передачи пакета можно вычислить по известному соотношению:

$$p_e = 1 - (1 - p_b)^L,$$

где L – длина пакета.

3.1. Пошаговая передача. В схеме пошаговой повторной передачи на каждом этапе приемник проверяет правильность приема пакета и запрашивает повторную передачу, если поступило сообщение о пропаже пакета (СПП), пока не будет получен правильный пакет. После этого на узел-источник отправляется подтверждение успешного приема (ПУП) пакета, свидетельствующее об успешном приеме. Рассмотрим пример, показанный на рис. 2,а. Первая передача пакета не удалась между узлами A и B . Поэтому узел B отправляет пакет СПП к узлу A , запрашивая повторную передачу. После этого узел A повторно передает пропавший пакет. После успешного получения пропавшего пакета узел B отправляет пакет ПУП для узла A .

Пусть m_i – количество попыток передачи на переходе с номером i между какими-либо узлами, а p_i – частота ошибок передачи пакета на переходе i . Тогда величины максимальной задержки времени передачи и потребления энергии могут быть вычислены следующим образом.

1) *Задержка:* предполагается, что длина пакетов ПУП и СПП одинаковая и равная L_a . В исходном узле S кривая прибытия выражается как $\alpha_1(t) = \rho_1 t + \sigma_1$. Согласно (2) кривая обслуживания на шаге i ($1 \leq i \leq n$) определяется в следующем виде:

$$\beta_i(t) = C \frac{S_i}{T} [t - (T - S_i)]^+, \quad (7)$$

где S_i – длина слота, отведенного каналу i . Поскольку входные данные текущего перехода равны выходным данным предыдущего перехода, то $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}^*(t)$ для ($2 \leq i \leq n$), а кривую прибытия трафика на i -м ($1 \leq i \leq n$) шаге можно получить рекурсивно на основе теоремы 2:

$$\alpha^*(t) \leq \sup_{s \geq 0} \{\alpha_i(t+s) - \beta_i(s)\} = \alpha_i(t) + \rho_i(T - S_i). \quad (8)$$

Основываясь на результатах теоремы 1 и выражениях (7) и (8), можно записать максимальную задержку времени передачи на шаге i как:

$$D(t) \leq \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf_{\tau \geq 0} [\alpha_i(t) \leq \beta_i(t + \tau)] \right\} = \frac{\sigma_i T}{CS_i} + (T - S_i). \quad (9)$$

На каждом шаге ожидаемое количество передач может быть оценено отношением $1/(1 - p_i)$. Следовательно, ожидаемая максимальная задержка (D_{hh}) отправки пакета от исходного узла S к конечному узлу D может быть вычислена путем суммирования задержек времени передачи на каждом переходе от узла к узлу:

$$D_{hh} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 - p_i} D_i. \quad (10)$$

2) *Энергопотребление.* На потребление энергии влияют два фактора: пакеты данных и пакеты ПУП (СПП). Для простоты потребление энергии, необходимой для декодирования, не учитывается, хотя это несложно сделать. Согласно энергетической модели, потребление энергии на i -м переходе может быть рассчитано с учетом (6) следующим образом:

$$E_i = 2E_{start}^i + \frac{L + L_a}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (11)$$

Следовательно, общее ожидаемое потребление энергии E_{hh} для передачи пакета от исходного узла S к конечному узлу D может быть вычислено, учитывая (10), из соотношения:

$$E_{hh} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 - p_i} E_i. \quad (12)$$

3.2. Сквозная повторная передача. В схеме сквозной повторной передачи промежуточные узлы просто пересылают полученные пакеты на следующий переход и не проверяют правильность приема пакетов. Когда пакет прибывает в узел назначения D , то этот узел проверяет пакет и запрашивает повторную передачу с помощью пакета СПП, обращаясь непосредственно к узлу S , если пакет принят неправильно. В противном случае он отправляет пакет ПУП к узлу S , указывающий на успешный прием пакета. Пример на рис. 2,б).

Пусть p_i – частота ошибок при передаче пакета на шаге i , а m – количество попыток передачи. Тогда временная задержка передачи и потребление энергии могут быть получены, как показано ниже.

1) *Задержка.* В этой схеме повторная передача выполняется сквозным способом, поэтому можно вывести эквивалентную кривую обслуживания для всего канала на основе теоремы 3 и уравнения (7):

$$\beta_{e2e} = (\beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_n) = R_{e2e}(t - T_{e2e}), \quad (13)$$

где R_{e2e} и T_{e2e} можно вычислить из соотношений:

$$R_{e2e} = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ C \frac{S_i}{T} \right\}; \quad T_{e2e} = \sum_{i=1}^n (T - S_i). \quad (14)$$

В соответствии с моделью трафика кривая прибытия входящего потока в узле S определяется как: $\alpha_{in}(t) = \rho_{in}t + \sigma_{in}$. На основании теоремы 1 максимальная временная задержка D_{st} для одной передачи от узла S к узлу D может быть рассчитана следующим образом:

$$D_{st} = \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf_{\tau \geq 0} [\alpha_{in}(t) \leq \beta_{e2e}(t + \tau)] \right\} = \frac{\sigma_{in} T}{R_{e2e}} + T_{e2e}. \quad (15)$$

При сквозной повторной передаче общее ожидаемое количество передач можно оценить как $1/p_{st}$, где $p_{st} = \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$. Тогда ожидаемая максимальная задержка времени передачи D_{e2e} может быть рассчитана по выражению:

$$D_{e2e} = \frac{1}{p_{st}} D_{st}. \quad (16)$$

2) *Энергопотребление.* В схеме сквозной повторной передачи только узел-приемник должен отправлять пакеты ПУП и СПП, другие промежуточные узлы просто пересылают пакеты данных, не участвуя в процессе управления трафиком. Согласно энергетической модели, потребление энергии на i -м шаге может быть рассчитано следующим образом:

$$E_i = 2E_{start}^i + \frac{L}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (17)$$

Следовательно, общее ожидаемое потребление энергии E_{hbh} для передачи пакета от узла S к узлу D может быть вычислено по формуле:

$$E_{e2e} = \frac{1}{p_{st}} \sum_{i=1}^n E_i + \frac{L}{R} (P_{tx}^i + P_{rx}^i + 2P_{cir}^i + P_{amp}). \quad (18)$$

В (18) первый элемент вычисляет потребление энергии для передачи пакетов данных, а второй элемент вычисляет энергию для передач пакетов ПУП и СПП.

4. Оценка работоспособности БСД

4.1. *Экспериментальная установка.* В этом разделе сравнивается максимальная задержка по времени передачи данных и потребление энергии для схем пошаговой и сквозной повторной передач. Параметры, используемые в экспериментах, показаны в таблице, которая соответствует параметрам, использованным в [25–27]. Расстояние между линиями связи выбирается случайным образом от 5 до 10 м, что типично для большинства приложений БСД. Длины фрейма T и слота S выбраны равными 0,2 с и 0,01 с, соответственно. Скорость входных данных для схемы сквозной повторной передачи $\rho_{in} = 30$ бит/с, что соответствует передаче одного пакета каждые восемь секунд. Для пошаговой схемы количество пакетов ПУП (СПП) такое же, как и пакетов данных, поэтому скорость передачи данных на первом переходе $\rho_1 = (1 + L/L_a) \rho_{in}$. Размеры пакетов данных – по 60 бит.

Таблица

Параметры передачи пакетов в эксперименте

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Мощность при передаче пакета	P_{tx}	19,1	мВт
Мощность при приеме пакета	P_{rx}	14,6	мВт
Мощность электронных компонентов	P_{cir}	12	мВт
Начальная энергия	E_{start}	1,0	мкДж
Длина передаваемого пакета данных	L	240	бит
Длина пакетов ПУП и СПП	L_a	80	бит
Пропускная способность канала	C	19,2	кбит/с

4.2. Сравнение двух методов передачи. Проводились следующие эксперименты, чтобы сравнить максимальную задержку по времени передачи и энергопотребление двух схем повторной передачи. Значения величины BER варьировались от 10^{-4} до 5×10^{-3} . На рис. 3 видно, что максимальная временная задержка схем повторной передачи увеличивается с увеличением BER. Кроме того, максимальное время задержки увеличивается с ростом числа переходов. Более того, максимальные временные задержки схемы пошаговой повторной передачи больше, чем у схемы сквозной повторной передачи. Когда число переходов равно 2, среднее максимальное время задержки сквозной схемы на 28,9% меньше, чем у пошаговой схемы. Когда число переходов равно 4 и 6, длительности максимальных задержек сквозной схемы падают на 43,8% и 49,2%, соответственно. Причина в том, что в схеме пошаговой передачи каждый промежуточный узел должен передавать пакеты ПУП (СПП), что, естественно, приводит к увеличению трафика, поэтому время задержки выше, чем при сквозной схеме.

На рис. 4 показано энергопотребление двух схем с разными значениями BER. Когда величина BER увеличивается с 10^{-4} до 10^{-3} , потребление энергии уменьшается. Но когда величина BER увеличивается с 2×10^{-3} до 5×10^{-3} , потребление энергии также увеличивается. Причина в том, что усилителю мощности необходимо потреблять больше энергии, чтобы гарантировать меньшее значение BER на приемнике (уравнение (6)). Следовательно, когда величина BER низка, потребление энергии может быть выше. На рис. 4 также видно, что энергопотребление при пошаговой схеме меньше, чем при сквозной схеме. Это связано с тем, что в сквозной схеме пакеты с ошибками не будут отбраковываться до тех пор, пока они не достигнут пункта назначения, что приводит к потере энергии. Но такого вида потерь энергии можно избежать в схеме пошаговой передачи.

На рис. 5 и 6 показано сравнение величин задержки и потребления энергии, соответственно, от изменения вероятности успешного достижения пакетом цели. На рис. 5, когда величина BER низка (10^{-4}), показатели сквозной схемы лучше, чем у пошаговой схемы. Но когда величина BER высока (10^{-3}), у пошаговой схемы показатели выше. Это указывает на то, что при высоком значении BER для достижения той же целевой вероятности успеха требуется больше попыток повторных передач по сквозной схеме.

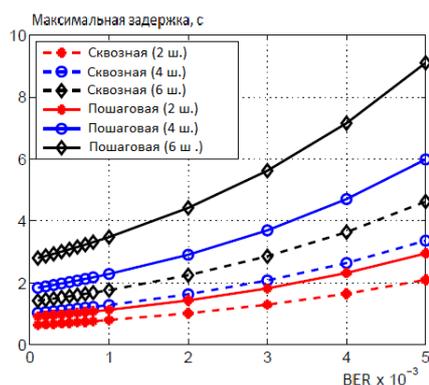


Рис. 3. Сравнение максимальной задержки передачи пакетов для двух способов передачи в зависимости от BER

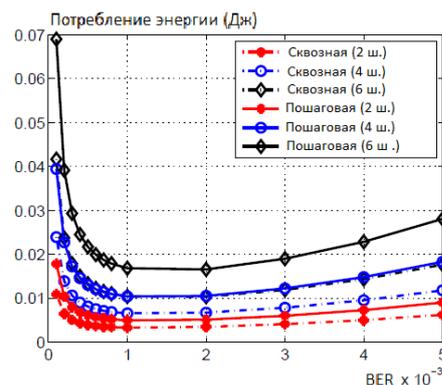


Рис. 4. Сравнение энергопотребления двух способов передачи в зависимости от BER

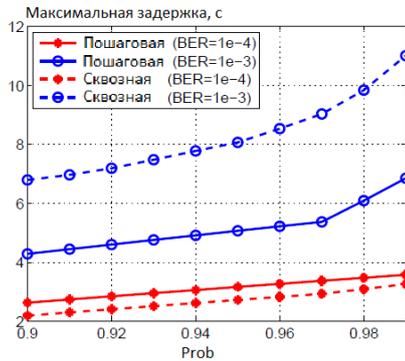


Рис. 5. Сравнение максимальной задержки у двух способов передачи в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели ($Prob$) для различных BER

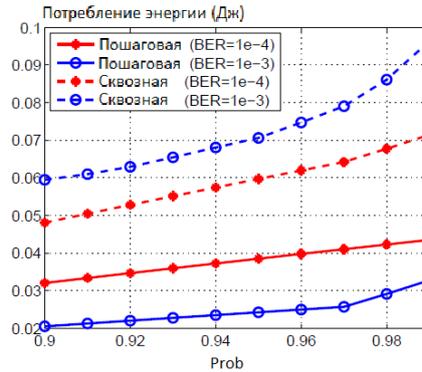


Рис. 6. Сравнение энергопотребления для двух способов передачи в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели ($Prob$) при различных BER

На рис. 6 показано, как потребление энергии изменяется в зависимости от вероятности успешного достижения пакетом цели. Можно видеть, что схема сквозной ретрансляции потребляет в среднем на 35,8% и 65,9% больше энергии, чем схема поэтапной передачи, когда величина BER составляет 10^{-4} и 10^{-3} , соответственно. Кроме того, можно заметить, что для схемы пошаговой передачи потребление энергии при высоком значении BER (10^{-3}) меньше, чем при низком значении BER (10^{-4}). Причина в том, что усилитель мощности потребляет больше энергии, чтобы гарантировать меньший уровень BER на приемнике.

Чтобы проверить результаты оценки временной задержки, сравнивались аналитические результаты с результатами моделирования с использованием пакета MATLAB для одних и тех же входных данных. Длина пути составляет 4 перехода, а величина BER составляет 5×10^{-4} . Другие параметры показаны в таблице. На рис. 7 видно, что все результаты моделирования находятся в пределах аналитических результатов. Это указывает на то, что сетевые вычисления хорошо справляются с ограничением длительностей задержек передачи пакетов. Для схем сквозной и пошаговой ретрансляции аналитические задержки на 4,3% и 5,8% больше, чем смоделированные максимальные задержки, соответственно.

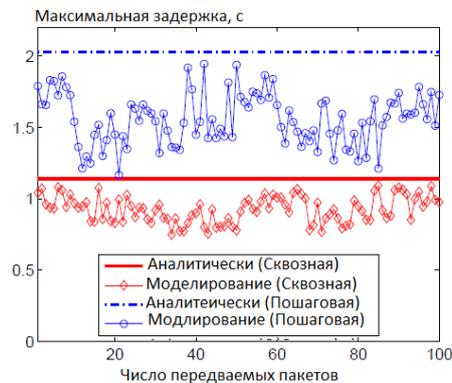


Рис. 7. Сравнение аналитически рассчитанных максимальных задержек передачи данных с результатами, полученными с помощью моделирования

Выводы. Из-за ненадежной беспроводной связи и ограниченного бюджета энергии обеспечение надежной передачи данных оказалось нетривиальной проблемой для БСД. Способ на основе повторной передачи был принят как один из наиболее распространенных схем решения этой проблемы. Впервые представлена модель трафика, модель обслуживания и модель энергии. На основе этих моделей разработаны аналитические методы оценки максимальной длительности задержки передачи и потребления энергии. Одновременно рассмотрена методология получения вероятностной оценки успешной передачи пакетов при схемах поэтапной и сквозной повторной передач.

Предложенный аналитический метод определения границ временной задержки передачи пакетов подтвержден результатами моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks // Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 835-863.
2. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E.* Wireless Sensor Networks: a Survey // Computer Networks. – 2002. – Vol. 38, No. 4. – P. 393-422.
3. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/.
4. *Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Кузин С.А.* Распределенная система датчиков для авионики, управляемая по беспроводному радиоканалу // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2017. – С. 100-103.
5. *Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Кузин С.А., Светлов М.С.* Распределенная система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. VIII Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 306-313.
6. *Кузин С.А., Соколов Д.Н., Ивженко С.П., Умнова Е.Г., Пчелинцева Е.Г., Фролова Н.Б.* Модель беспроводной сенсорной сети повышенной производительности и надежности // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 495-502.
7. *Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Светлова М.К.* Информационный канал повышенной помехоустойчивости в распределенных беспроводных бортовых системах // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. VIII Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 314-321.
8. *Львов А.А., Кузин С.А., Светлов М.С., Львов П.А.* Моделирование распределенной системы датчиков давления на основе беспроводного радиоканала связи // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Матер. V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Т. 1. – Тамбов: Изд. центр «ТГТУ», 2018. – Вып. 5. – С. 54-60.
9. *Кузин С.А., Аль-Таи О.Д.М., Белянская И.А.* Модельные исследования энергоэффективной передачи сигналов данных в беспроводной сенсорной сети // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 503-513.
10. *Алалван А.Р.Д., Львов П.А., Светлов М.С., Львов А.А., Миценко Д.А., Никифоров А.А.* Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. X Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 273-280.
11. *J., Mukherjee B., Ghosal D.* Wireless Sensor Network Survey // Computer Networks. – 2008. – Vol. 52. – P. 2292-2330.
12. *Prodanovic R., Rancic D., Vulic I., Zoric N., Bogicevic D., Ostojic G., Sarang S., Stankovski S.* Wireless Sensor Network in Agriculture: Model of Cyber Security // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (6747). – P. 1-22. – DOI: 10.3390/s20236747.

13. *Muduli L., Mishra D.P., Jana P.K.* Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2018. – Vol. 106. – P. 48-67.
14. *Culler D., Estrin D., Srivastava M.* Overview of Sensor Networks // *IEEE Computer*. – 2004. – Vol. 37, No. 8. – P. 41-49.
15. *Park S.J., Vedantham R., Sivakumar R., Akyildiz I.F.* A Scalable Approach for Reliable Downstream Data Delivery in Wireless Sensor Networks // *Proc. of the 5th ACM Int. Symp. on Mobile ad hoc Networking and Computing*. – 2004. – P. 78-89.
16. *Wan C.Y., Campbell A.T., Krishnamurthy L.* PSFQ: a Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks // *Proc. of the 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. – 2002. – P. 1-11.
17. *Pai H., Sung J., Han Y.S.* Adaptive Retransmission for Distributed Detection in Wireless Sensor Networks // *IEEE Int. Conf. on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'06)*. – 2006. – P. 2-7.
18. *Boudec J., Thiran P.* Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet, Springer: LNCS 2050, 2004.
19. *Schmitt J.B., Roedig U.* Sensor Network Calculus – a Framework for Worst Case Analysis // *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)*. – 2005. – P. 141-154.
20. *Koubaa A., Alves M., Tovar E.* Modeling and Worst-case Dimensioning of Cluster-tree Wireless Sensor networks // *Proc. 27th IEEE Int. Real-time Systems Symp. (RTSS'06)*. – 2006. – P. 412-421.
21. *Roedig U., Gollan N., Schmitt J.B.* Validating the Sensor Network Calculus by Simulations // *Proc. 2nd Performance Control in Wireless Sensor Networks Workshop at the 2007 WICON Conf.* – 2007. – Article No. 34. – P. 1-8.
22. *Liu B., Ren F., Lin C., Ouyang Y.* Performance Analysis of Retransmission and Redundancy Schemes in Sensor Networks // *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC'08)*. – 2008. – P. 4407-4413.
23. *Schmitt J.B., Zdarsky F.A., Thiele L.* A Comprehensive Worst Case Calculus for Wireless Sensor Networks with In-network Processing // *Proc. 28th IEEE Int. Real-time Systems Symposium (RTSS'07)*. – 2007. – P. 193-202.
24. *Xia F.* QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8, No. 2. – P. 1099-1110.
25. *Ragunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M.B.* Energyaware Wireless Microsensor Networks // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2002. – Vol. 19, No. 3. – P. 40-50.
26. *Taddia C., Mazzini G.* On the Retransmission Method in Wireless Sensor Networks // *28th IEEE Int. Real-Time Systems Symp.* – 2007. – P. 193-202.
27. Crossbow Technology. Mica2 Data sheet. – Режим доступа: [http://www.xbow.com/products/Product pdf files /Wireless pdf/MICA2 Datashet.pdf](http://www.xbow.com/products/Product%20pdf%20files/Wireless%20pdf/MICA2%20Datashet.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).

REFERENCES

1. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks, *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 835-863.
2. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E.* Wireless Sensor Networks: a Survey, *Computer Networks*, 2002, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422.
3. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems, *Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. Minsk, Belarus, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/.
4. *L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Kuzin S.A.* Raspredelyonnaya sistema datchikov dlya avioniki, upravlyaemaya po besprovodnomu kanalu [Distributed sensor system for avionics, wirelessly controlled], *Nadezhnost' i kachestvo* [Reliability and Quality]: TRudy' Mezhdunar. Symp. [Proc. of Int. Symp.]. Penza: PSU, 2017, Vol. 1, pp. 100-103.
5. *Klenov D.V., L'vov A.A., L'vov P.A., Kuzin S.A., Svetlov M.S.* Raspredeleonnaya sistema datchikov dlya upravleniya na osnove besprovodnogo radiokanala svyazi [Distributed sensor system for control based on wireless radio communication channel], *Sistemnyy sintez i*

- prikladnaya sinergetika: Sb. tr. VIII Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, pp. 306-313.
6. Kuzin S.A., Sokolov D.N., Ivzhenko S.P., Umnova E.G., Pchelintseva E.G., Frolova N.B. Model' besprovodnoy sensornoy seti povyshennoy proizvoditel'nosti i nadezhnosti [A model of a wireless sensor network of increased performance and reliability], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of control, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP «Lodi», 2019, pp. 495-502.
 7. Klenov D.V., L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Svetlova M.K. Informatsionnyy kanal povyshennoy pomekhoustoychivosti v raspredelennykh besprovodnykh bortovykh sistemakh [Information channel of increased noise immunity in distributed wireless onboard systems], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. VIII Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and applied synergetics: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, pp. 314-321.
 8. L'vov A.A., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A. Modelirovanie raspredelennoy sistemy datchikov davleniya na osnove besprovodnogo radiokanala svyazi [Modeling a distributed system of pressure sensors based on a wireless radio communication channel], *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizayn: Mater. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the V International scientific-practical conference]: in 3 vol. Vol. 1. Tambov: Izd. tsentr «TGTU», 2018, Issue 5, pp. 54-60.
 9. Kuzin S.A., Al'-Tai O.D.M., Belyanskaya I.A. Model'nye issledovaniya energoeffektivnoy peredachi signalov dannykh v besprovodnoy sensornoy seti [Model studies of energy-efficient transmission of data signals in a wireless sensor network], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP «Lodi», 2019, pp. 503-513.
 10. Alalvan A.R.D., L'vov P.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Nikiforov A.A. Problemy obespecheniya nadezhnosti besprovodnykh setey datchikov [Problems of ensuring the reliability of wireless sensor networks], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. X Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 273-280.
 11. J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless Sensor Network Survey, *Computer Networks*, 2008, Vol. 52, pp. 2292-2330.
 12. Prodanovic R., Rancic D., Vulic I., Zoric N., Bogicevic D., Ostojic G., Sarang S., Stankovski S. Wireless Sensor Network in Agriculture: Model of Cyber Security, *Sensors*, 2020, Vol. 20 (6747), pp. 1-22. DOI: 10.3390/s20236747.
 13. Muduli L., Mishra D.P., Jana P.K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review, *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, Vol. 106, pp. 48-67.
 14. Culler D., Estrin D., Srivastava M. Overview of Sensor Networks, *IEEE Computer*, 2004, Vol. 37, No. 8, pp. 41-49.
 15. Park S.J., Vedantham R., Sivakumar R., Akyildiz I.F. A Scalable Approach for Reliable Downstream Data Delivery in Wireless Sensor Networks, *Proc. of the 5th ACM Int. Symp. on Mobile ad hoc Networking and Computing*, 2004, pp. 78-89.
 16. Wan C.Y., Campbell A.T., Krishnamurthy L. PSFQ: a Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. of the 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 2002, pp. 1-11.
 17. Pai H., Sung J., Han Y.S. Adaptive Retransmission for Distributed Detection in Wireless Sensor Networks, *IEEE Int. Conf. e on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'06)*, 2006, pp. 2-7.
 18. Boudec J., Thiran P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Springer, LNCS 2050, 2004.
 19. Schmitt J.B., Roedig U. Sensor Network Calculus – a Framework for Worst Case Analysis, *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)*, 2005, pp. 141-154.

20. *Koubaa A., Alves M., Tovar E.* Modeling and Worst-case Dimensioning of Cluster-tree Wireless Sensor networks, *Proc. 27th IEEE Int. Real-time Systems Symp. (RTSS'06)*, 2006, pp. 412-421.
21. *Roedig U., Gollan N., Schmitt J.B.* Validating the Sensor Network Calculus by Simulations, *Proc. 2nd Performance Control in Wireless Sensor Networks Workshop at the 2007 WICON Conf.*, 2007, Article No. 34, pp. 1-8.
22. *Liu B., Ren F., Lin C., Ouyang Y.* Performance Analysis of Retransmission and Redundancy Schemes in Sensor Networks, *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC'08)*, 2008, pp. 4407-4413.
23. *Schmitt J.B., Zdarsky F.A., Thiele L.* A Comprehensive Worst Case Calculus for Wireless Sensor Networks with In-network Processing, *Proc. 28th IEEE Int. Real-time Systems Symposium (RTSS'07)*, 2007, pp. 193-202.
24. *Xia F.* QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 2, pp. 1099-1110.
25. *Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M.B.* Energyaware Wireless Microsensor Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, Vol. 19, No. 3, pp. 40-50.
26. *Taddia C., Mazzini G.* On the Retransmission Method in Wireless Sensor Networks, *28th IEEE Int. Real-Time Systems Symp.*, 2007, pp. 193-202.
27. Crossbow Technology. Mica2 Data sheet. Available at: [http://www.xbow.com/products/Product pdf files /Wireless pdf/MICA2 Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/Product%20pdf%20files/Wireless%20pdf/MICA2%20Datasheet.pdf) (accessed 12 May 2021).

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Д.А. Зимняков.

Алалван Амин Раад Джихад – Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; e-mail: ameenraad2@gmail.com; г. Саратов, Россия; тел.: 79915003091; аспирант.

Шаммари Наджм Абед Мандила – e-mail: najim.abd55@yahoo.com; аспирант.

Мищенко Дмитрий Алексеевич – e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; тел. +79093353999; аспирант.

Львов Алексей Арленович – e-mail: alvova@mail.ru; тел.: +79172015675; кафедра радиоэлектроники и телекоммуникации; д.т.н.; профессор.

Светлов Михаил Семенович – Институт проблем точной механики и управления РАН; e-mail: svetlovms@yandex.ru; г. Саратов, Россия; тел.: +79878263745; лаборатория системных проблем управления и автоматизации в машиностроении; д.т.н.; в.н.с.

Alalvan Amin Raad Jihad – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: ameenraad2@gmail.com.ru; Saratov, Russia; phone: +79915003091; postgraduate student.

Shammari Najim Abed Mandila – e-mail: najim.abd55@yahoo.com; postgraduate student.

Mishchenko Dmitriy Alexeevich – e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; phone: +79093353999; postgraduate student.

L'vov Alexey Arlenovich – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; the department of radioelectronics and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79878263745; laboratory of system problems of control and automation in mechanical engineering;; dr. of eng. sc.; leading researcher.

В.П. Асовский, А.С. Кузьменко

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО
ОПРЫСКИВАНИЯ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ
АВИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИХ РАБОТ**

Рассмотрены отдельные практические вопросы решения задач совершенствования технологии авиационно-химических работ с использованием методов компьютерного моделирования его процессов, в частности на нетрадиционных режимах авиационного опрыскивания. Эти режимы характерны для обработок участков с препятствиями на границах, когда внесение рабочих жидкостей производится при снижении воздушного судна в заходе на производственный проход над участком на требуемой высоте полета и наборе высоты после его окончания. Проведенные расчетно-теоретические исследования на примере самолета-биплана Ан-2 с использованием разработанных и апробированных ранее многофакторных программных средств моделирования процессов формирования вихревого следа самолета и осадения в нем характерного для авиационного опрыскивания спектра капель рабочих жидкостей показали, что использование нетрадиционных технологических режимов обработок способно существенно повысить производительность, безопасность и интегральную эффективность авиационно-химических работ и мероприятий химизации сельскохозяйственного производства в целом. В частности, показано, что для повышения эффективности авиационного опрыскивания участков, ограниченных препятствиями, технически возможно и экономически целесообразно использовать схему проведения работ, предусматривающую начало и окончание обработки таких участков на этапе снижения и набора высоты при удалениях от препятствий, соответствующих 1-2 с полета воздушного судна (для самолета Ан-2 на удалениях 50–150 м при высоте полета до 20 м). Такая схема обеспечивает рост производительности авиационного опрыскивания до 10–15 %, уменьшение себестоимости обработок на 3–5 % и увеличения экономической эффективности на 2–3 % при росте их суммарного эффекта на 6–8 %.

Авиационно-химические работы; авиационное опрыскивание; компьютерное моделирование; воздушное судно; режимы полета; осадение; производительность; эффективность.

V.P. Asovsky, A.S. Kuzmenko

**COMPUTER SIMULATION OF AVIATION SPRAYING WHEN IMPROVING
THE TECHNOLOGY OF AERIAL-CHEMICAL WORKS**

The article considers some practical issues of solving the problems of improving the technology of aerial-chemical works using methods of computer modeling of its processes, in particular, on non-traditional modes of aviation spraying. These modes are typical for the treatment of areas with obstacles at the borders, when the introduction of working fluids is carried out when the aircraft descends in the approach to the production passage over the area at the required flight altitude and climb after its end. The carried out computational and theoretical studies on the example of the An-2 biplane aircraft using the previously developed and tested multifactor software tools for modeling the processes of forming a vortex trace of an aircraft and depositing in it a spectrum of drops of working fluids characteristic of aviation spraying have shown that the use of unconventional technological treatment modes can significantly increase the productivity, safety and integral efficiency of aerial-chemical works and measures for chemicalization of agricultural production in general. It is shown that to increase the efficiency of aviation spraying of areas limited by obstacles, it is technically possible and economically feasible to use a work scheme that provides for the beginning and end of processing of such areas at the stage of descent and climb at distances from obstacles corresponding to 1-2 seconds of the aircraft flight (for An-2 aircraft at distances of 50–150 m at a flight altitude of up to 20 m). Such a scheme provides an increase in the productivity of aviation spraying up to 10–15 %, a reduction in the prime cost of treatments by 3–5 % and an increase in economic efficiency by 2–3 % with an increase in their total effect by 6–8 %.

Aerial-chemical works; aerial spraying; computer simulation; aircraft; flight modes; deposition; productivity; efficiency.

Введение. Авиационно-химические работы (АХР), предусматривающие внесение воздушными судами (ВС) различных жидких, сыпучих и биологических веществ, являются значимым фактором обеспечения деятельности и эффективности сельского, лесного и коммунального хозяйства страны [1, 2]. Несмотря на более чем полувековой опыт массового производства АХР и отработанные на практике технологические режимы выполнения этих работ до настоящего времени остаются нерешенными ряд проблем, связанных с обеспечением качества и эффективности таких обработок.

Одной из таких проблем при производстве авиационного опрыскивания, составляющего до 90 % всех объемов АХР, является невозможность проведения с использованием традиционного способа опрыскивания при горизонтальном полете ВС с заданной предельно малой высотой обработок концевых участков сельскохозяйственных угодий с препятствиями на их границах, что значительно уменьшает производительность и конкурентоспособность выполнения АХР. Решение этой проблемы, как показывает анализ, возможно только с использованием нетрадиционных способов авиационного опрыскивания на режимах переменных высот полета ВС, характерных для снижения и набора высоты при полете ВС над концевыми участками с препятствиями на границах.

Предварительная оценка применимости и параметров авиационного опрыскивания на таких нетрадиционных режимах возможна с применением методов компьютерного моделирования его процессов, являющегося, как показывает опыт [2–5 и др.], мощным средством оперативных и малозатратных исследований показателей производства АХР и основным элементом проведенных работ.

Основная часть. Основными значимыми препятствиями на границах сельскохозяйственных участков в настоящее время являются защитные лесополосы (ЛП), которые являются частью агролесомелиоративного комплекса и играют важную роль в борьбе с эрозионными процессами, предотвращении засухи, улучшения биомикроклимата почв и повышении урожайности ([6–8 и др.]). Высота защитных ЛП в зависимости от почвенно-климатических условий варьируется от 6 до 22 м и определяет типовые размеры сельскохозяйственных участков (длину, ширину) в соответствующих условиях [6, 8 и др.]. Степень обеспеченности сельскохозяйственных угодий ЛП в наиболее развитых сельскохозяйственных регионах страны (Краснодарский край, Ростовская область и др.) в настоящее время превышает 60 % при средней их высоте $H_{п} = 12–16$ м, т.е. проблема обработок участков с препятствиями на границах для этих регионов имеет массовый и значимый характер, что определяет актуальность ее решения.

Расчеты показывают, что при нормируемой для АХР безопасной высоте прохода ВС над препятствиями $H_{без} = 10$ м [9, 10] при высоте ЛП в пределах 10–20 м размах концевых зон участков, которые не обрабатываются при традиционной технологии опрыскивания, составляет 400–700 м, что ограничивает возможности авиационной обработки участков, особенно с малой длиной гона. Аналогичный диапазон при возможном уменьшении $H_{без}$ до 5 м составляет 270–550 м, что несколько расширяет возможности проведения АХР в таких условиях, но потенциально связан со снижением безопасности полетов и не может рассматриваться как действенное средство решения указанной проблемы. Примечательно, что при обработке сельхозучастков с характерными соотношениями размеров при длине фактического гона на АХР в пределах 500–2000 м остается не обработанными от 60–80 до 15–25 % площади подлежащих обработке участков, что связано с уменьшением заказов на проведение АХР, особенно небольших участков, и дополнительными затратами заказчиков АХР на «доработку» необработанных зон с использованием наземной техники. Это обстоятельство дополнительно подчеркивает масштаб проблемы обработки при АХР концевых участков и необходимость ее исследования и решения.

В рамках проведенных исследований для решения указанной проблемы в среде программирования DELPHI был сформирован расчетный комплекс моделирования авиационного внесения рабочих веществ. В нем на новом уровне были реализованы апробированные ранее [2] математические модели описания условий и процессов осаждения капель многокомпонентных рабочих жидкостей с учетом испарения компонентов, диффузии, вращения и дробления капель в поле индуктивных скоростей вихревого следа ВС с возможностью его построения методом дискретных вихрей [11–13 и др.], в т.ч. при вертикальном и горизонтальном маневрировании ВС.

Оценка адекватности и точности сформированного программного комплекса проводилась сравнением имеющихся экспериментальных и полученных для одинаковых условий с использованием комплекса расчетных данных для традиционных режимов авиационного опрыскивания наиболее распространенного при производстве АХР самолета-биплана Ан-2. Анализ показал, что, не смотря на объективный стохастический характер процессов и показателей авиационного опрыскивания, для расчетных и экспериментальных данных наблюдается качественная близость (вид эпюр, соотношения показателей, порядок соответствующих величин и т.д.) и имеет место статистическая значимость полученных при моделировании расчетных функциональных зависимостей, что указывает на адекватное отражение сформированным программным комплексом сути и особенностей осаждения рабочих веществ для рассмотренных условий [14]. В свою очередь, точность оценки наиболее значимых обобщенных показателей внесения (ширина захвата, объемы и количество капель жидкости и др.) для рассмотренных вариантов составляет примерно 4-5 %, что следует признать достаточно высоким показателем для моделируемого процесса и позволяет использовать программный комплекс для оценки нетрадиционных режимов авиационного опрыскивания.

Проведенные расчеты конфигурации вихревого следа самолета Ан-2 при реализации типовой схемы полета при опрыскивании участков с препятствиями (ЛС) на границах (рис. 1) показывают, что формирование вихревого следа при этом качественно идентично стационарному режиму горизонтального полета на рабочей для опрыскивания высоте.

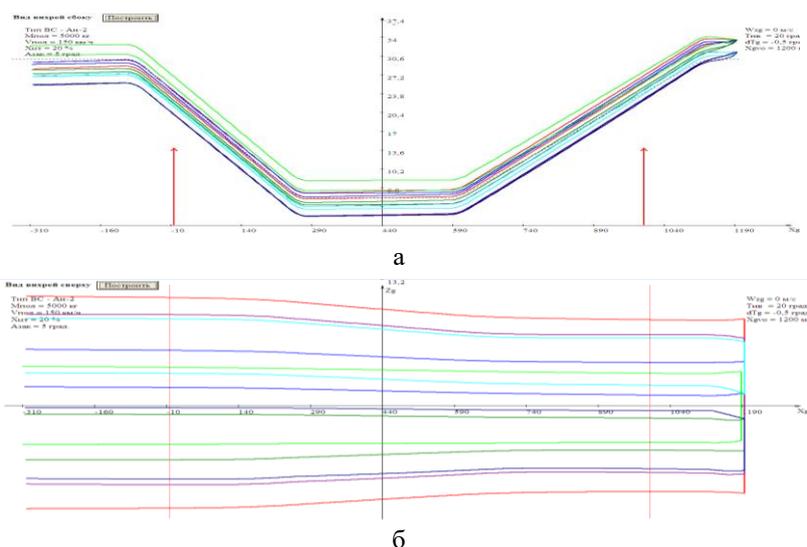


Рис. 1. Расчетная конфигурация (вид сбоку (а) и сверху (б)) вихревого следа самолета Ан-2 ($V=150$ км/ч) при обработке участка длиной 1 км с препятствиями на границах ($H_{п} = 14$ м, $H_{без} = 10$ м)

В частности можно отметить сильное взаимодействие между собой свободных вихрей П-образных вихревых комбинаций крыльев и элементов их механизации, воздушного винта и оперения самолета с их смещением относительно линии пролета, формирование 2 характерных концевых вихревых «сгустков» свободных вихрей и т.д. [14], однако такой след значительно отличается по пространственной конфигурации, прежде всего в вертикальной плоскости ввиду изменения высот полета при заходе самолета на гон и выходе из него с учетом высоты препятствий.

Полученная конфигурация вихревого следа и динамика его формирования позволяет выполнить моделирование процессов осаждения капель рабочих жидкостей, выпущенных с самолета на отмеченных элементах полета самолета над концевыми зонами обрабатываемого участка.

На рис. 2 и 3 для примера показаны расчетные эпюры счетного и объемного (по действующему веществу) распределения в волнах осаждения рабочей жидкости при опрыскивании самолетом Ан-2 [15, 16] с нормой 50 л/га ($V = 150$ км/ч, закрылки 5° , $H_p = 5$ м, [17] соответственно на режиме снижения (заход на гон) и при выходе из гона.

По результатам компьютерного моделирования для отмеченных нетрадиционных режимов опрыскивания, в частности, определено:

- ◆ эпюры распределения жидкости на обрабатываемом участке для режимов вертикального маневрирования самолета (при снижении и наборе высоты) существенно отличаются от традиционного режима опрыскивания («База (ГП)»);
- ◆ при опрыскивании концевых зон на режиме снижения наблюдается локальный рост концентрации капель и действующего вещества вдоль линии пролета и поперечное «поджатие» волны осаждения жидкости ($Z_{ср}$) при усилении этих тенденций по мере увеличения высоты выпуска жидкости (начала опрыскивания);

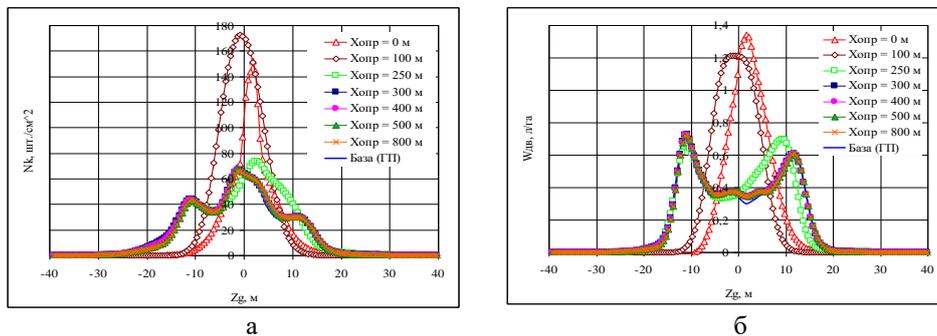


Рис. 2. Расчетные эпюры счетного (а) и объемного (по действующему веществу, б)) распределения в волнах осаждения при опрыскивании самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га на режиме снижения и гоне

◆ для опрыскивания на режиме набора высоты при прочих одинаковых условиях характерно усиливающееся с высотой «растягивание» волны оседающей жидкости в поперечной плоскости и наличие ярко выраженных двух относительно однородных «пиков» показателей слева и справа от линии пролета;

◆ изменение показателей волн осаждения жидкости, выпущенной на режимах вертикального маневрирования над концевыми зонами обрабатываемых участков, в целом связаны с уменьшением доли осевшей жидкости и ее дисперсности при росте концентрации препаратов в жидкости на участке, а также снижению при обработке с заданной шириной захвата средних величин плотности капель и дозировки препарата и их равномерности, что связано с падением показателей биологической эффективности авиационной обработки в концевых зонах.

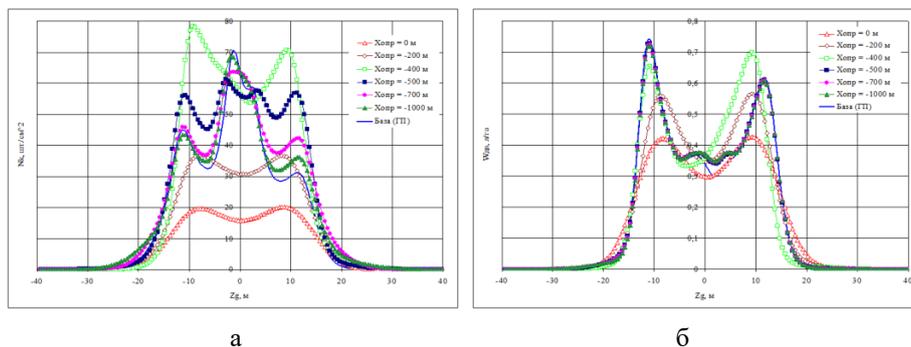


Рис. 3. Расчетные эпюры счетного (а) и объемного (по действующему веществу, б)) распределения в волнах осадения при опрыскивании самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га при выходе из гона

В табл. 1 и 2 для рассмотренных выше режимов опрыскивания и волн осадения показаны основные расчетные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости соответственно при снижении и наборе высоты, а также для полета на гоне.

Таблица 1

Основные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости при снижении и на гоне

Хор, м	Нор, м	Vy, м/с	Показатели волны осадения				Показатели внесения при Zp = 30 м				
			Zcp, м	Kп, %	Kw, %	МОД, мкм	Ncp, шт./см²	Kvp, %	Wcp, мл/га	Kvw, %	Рэф
0	24	-3	40,8	51,0	87,4	295,9	36,2	112,3	391,7	115,0	0,625
100	16,8	-3	54,3	56,3	90,9	338,65	51,4	118,6	398,5	118,2	0,744
250	6,1	-2,5	65,3	61,6	93,4	375,4	48,3	28,5	472,0	29,5	0,999
300	5	0	63,8	58,2	92,3	387,49	45,1	24,7	456,3	29,1	0,999
400	5	0	66,8	57,0	91,5	394,08	44,7	31,3	462,2	8,3	0,998
500	5	0	64,3	57,4	92,2	388,4	44,6	26,5	456,6	28,1	0,999
800	5	0	65,0	57,6	92,1	389,01	44,7	25,4	456,2	28,5	0,999
База	5	0	62,3	56,4	90,9	395,28	43,6	28,1	448,3	31,8	0,997

Таблица 2

Основные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости при наборе высоты и на гоне

Хор, м	Нор, м	Vy, м/с	Показатели волны осадения				Показатели внесения при Zp = 30 м				
			Zcp, м	Kп, %	Kw, %	МОД, мкм	Ncp, шт./см²	Kvp, %	Wcp, мл/га	Kvw, %	Рэф
500	5	0	62,3	56,4	90,9	395,3	43,6	28,1	448,3	31,8	0,997
1000	5	0	66,8	61,8	93,7	389,2	47,6	22,5	462,4	29,5	0,999
1300	5	0	60,5	65,1	94,8	380,2	49,9	17,2	463,4	29,0	1,000

1500	5	0	61,5	71,6	97,1	363,8	54,1	12,4	467,5	31,5	1,000
1600	5,2	0,8	55,3	78,3	98,6	365,5	59,7	23,0	508,0	40,8	1,000
1800	14,4	2	60,5	45,1	89,7	321,4	33,9	11,6	441,2	20,4	0,985
2000	24	2	48,8	25,1	78,2	315,7	19,37	8,77	401,4	13,0	0,460

Из представленных табличных данных показателей опрыскивания с отмеченными ранее параметрами для режима снижения и набора высоты самолета можно отметить достаточно очевидные изменения показателей опрыскивания для больших высот выпуска жидкости, в частности, уменьшение доли осевшей жидкости (количество капель K_p и объем препарата K_w) и ее дисперсности (медианно-объемный диаметр (МОД)), а также снижению при обработке с заданной шириной захвата (30 м) средних величин плотности капель (N_{cp}) и дозировки препарата (W_{cp}) и их равномерности (K_{vp} , K_{vw}), что связано с падением показателей составляющих и общей биологической эффективности (Рэф).

Результаты компьютерного моделирования процессов и показателей авиационного опрыскивания на характерных и нетрадиционных режимах внесения рабочих жидкостей дают возможность совершенствования технологий АХР с использованием вышеназванных приемов и интегральных показателей (критериев) эффективности таких работ.

В качестве критерия эффективности АХР при обработке разными i -ми способами некоторой культуры на конечной площади S может быть использован показатель в виде ([2]):

$$K_s = \frac{E_s}{Z_s} = \frac{\sum_i E_i}{\sum_i Z_i} = \bar{Z}_i K_i, \quad (1)$$

где E_s, Z_s – общий эффект и затраты на обработку площади $S = \sum_i F_i$, руб.;

E_i, Z_i – эффект и затраты обработки i -ым способом площади F_i , руб.;

$\bar{Z}_i = Z_i / \sum_i Z_i$ – относительные затраты по i -му способу обработки;

$K_i = E_i / Z_i$ – критерия эффективности i -го способа обработки.

Критерий эффективности i -го способа в (1) с учетом положений [2] для удобства анализа может быть представлен эквивалентными выражениями как

$$K_i = \frac{P_{эф} \bar{E}_{oi} F_i}{Z_i} = \frac{\bar{E}_{1i} \Pi_{ti}}{Z_{ti}} = \frac{\bar{E}_{1i}}{\bar{Z}_{1i}}, \quad (2)$$

где \bar{E}_{oi} – базовый удельный экономический эффект обработки заданным препаратом соответствующей культуры в средних условиях, руб./га;

Π_{ti}, Z_{ti} – приведенные ко времени обработки T_i площади F_i производительность и себестоимость i -го способа, га/ч. и руб./ч.;

$\bar{E}_{1i}, \bar{Z}_{1i}$ – расчетный удельный экономический эффект и себестоимость обработки i -ым способом, руб./га.

В табл. 3 для примера выявления рациональных технологических приемов производства АХР с использованием компьютерного моделирования их процессов и критерияльных форм (1)–(2) для средних величин их параметров [18–20 и др.] представлены отдельные интегральные показатели по опрыскиванию самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га типового поля с длиной 2200 м и площадью при соотношении сторон 1: 2 около 240 га при наличии на его границах препятствий со средней высотой 14 м. Для этого случая при традиционной схеме производства АХР (базовый вариант № 0) длина гона ($L_{вн}$) составляет примерно 1500 м при общей длине участка на режимах захода на гон и выхода из него около 700 м, т.е. на рассматри-

ваемом поле по базовой схеме ВС не обрабатывается почти треть его площади, которую заказчик обработок вынужден дополнительно обрабатывать с применением, например, наземных опрыскивателей.

В представленной таблице для каждого последующего варианта (№ 1, 2, 3...) последовательно увеличивались удаления начала и окончания опрыскивания от соответствующих точек базового гона (с уменьшением расстояния до препятствий на входе (X+) и выходе (X-) и росте высот начала и окончания опрыскивания (H+, H-)) до совпадения с границами участка (№ 8)) с естественным увеличением при этом Lвн и сокращением нуждающихся в дополнительной наземной обработке площадей в пределах рассматриваемого поля.

Таблица 3

Расчетные показатели защитной обработки характерного участка с граничными препятствиями высотой 14 м самолетом Ан-2 (V =150 км/ч, закрылки 5°, Нр = 5 м, Н = 50 л/га) при различных вариантах включения и выключения опрыскивателя в пределах концевых зон

№ №	Показатели авиационной обработки											Общие показатели			
	X+/H+, м	X-/H-, м	Lвн, м	$P_{эф}$	$\Pi_{та}$, га/л.ч	Zта, р/га	Cга, п/га	\bar{E}_{1a} , п/га	K_a	E_a , т. п.	ΔE_a , т. п.	E_s , т. п.	Zs, т. п.	ΔE_s , т. п.	K_s
0	300/5	-440/5	1500	0,962	83,7	358	1743	2964	1,700	489	201	707	429	278	1,649
1	250/6,4	-350/7,2	1613	0,965	82,2	365	1750	2971	1,698	527	217	710	429	281	1,655
2	250/6,4	-300/9,6	1663	0,966	84,7	354	1739	2974	1,710	544	226	711	427	285	1,668
3	250/6,4	-250/12,0	1713	0,966	87,1	345	1730	2976	1,721	561	235	713	424	288	1,680
4	200/9,6	-200/14,4	1800	0,967	91,4	328	1713	2978	1,738	590	250	714	420	294	1,701
5	150/13,2	-150/16,8	1900	0,956	96,2	312	1697	2945	1,736	616	261	709	415	294	1,708
6	100/16,8	-100/19,2	2000	0,943	101,0	297	1682	2906	1,728	639	269	702	410	291	1,710
7	50/20,4	-50/21,6	2100	0,929	92,7	323	1708	2862	1,675	661	267	692	415	278	1,669
8	0/24	0/24	2200	0,904	96,8	310	1695	2784	1,643	674	264	674	410	264	1,643

Как видно из представленных данных, для авиационного способа обработки минимальные величины \bar{E}_{1a} и K_a соответствуют вариантам № 7 и 8 (начало и окончание опрыскивание в непосредственной близости от препятствий на границе поля), что обусловлено в основном падением интегральной биологической эффективности $P_{эф}$, которая не компенсируется связанным с увеличением Lвн общим ростом летной производительности $\Pi_{та}$ и уменьшением себестоимости использования самолета Zта при авиационной обработке. В свою очередь, максимальные значения этих показателей характерны для варианта № 4 при удалениях начала и окончания режима обработки примерно 200 м от границ поля. Примечательно, что расчетные величины K_a для вариантов с началом и окончанием опрыскивания, приближенным к границам участка (№ 3-6), ощутимо превосходят значения для базового варианта и являются более предпочтительными. Этот вывод подтверждает и сравнение абсолютных величин получаемого заказчиком АХР эффекта (E_a) и прибыли ($\Delta E_a = E_a - Z_a$) по всей обработанной авиационным способом площади поля. Характерно также, что максимальная величина эффекта авиационной обработки E_a соответствует варианту № 8 с началом и окончанием обработки на границе участка (за счет обработки всего участка со сниженной приведенной $P_{эф}$), а прибыли ΔE_a - № 6 для удалений от границ участка в пределах 100 м, т.е. выбор рациональной технологической схемы обработок не однозначен и обусловлен приоритетами выполнения этих работ.

Приоритеты заказчика АХР характеризуют, в частности, общие величины эффекта E_s и прибыли ΔE_s обработки всего поля, на котором дополнительно с использованием имеющейся наземной техники может быть выполнена обработка

зон, которые не были охвачены авиационным опрыскиванием. Как видно из таблицы 3, наивысший приоритет по этим показателям для заказчика имеют варианты № 4 и 5 (удаления от границ в пределах 150–200 м), а по эффективности (K_S) - № 6 при удалении 100 м.

Проведенный с использованием полученных в процессе компьютерного моделирования процессов АХР данных расчетно-теоретический комплексный анализ вариантов и схем организации обработок участков с препятствиями на границах для характерных производственных условий с применением развернутых технико-экономических оценок их результатов для заказчиков и исполнителей АХР позволил констатировать, что для повышения эффективности авиационного опрыскивания участков, ограниченных препятствиями, технически возможно и экономически целесообразно использовать схему проведения работ, предусматривающую начало и окончание обработки таких участков на этапе снижения и набора высоты при удалениях от препятствий, соответствующих 1–2 с полета ВС (для самолета Ан-2 на удалениях 50–150 м при высоте полета до 20 м), что обеспечивает рост производительности авиационного опрыскивания до 10–15 %, уменьшение себестоимости обработок на 3–5 % и увеличения экономической эффективности на 2–3 % при росте их суммарного эффекта на 6–8 %.

Заключение. Сформированные и апробированные в процессе исследований методические подходы, математические модели и расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей авиационного опрыскивания обеспечивает рост системности решения при решении актуальных научно-практических задач выполнения АХР, в т.ч. по совершенствованию технологий таких работ в конкретных условиях их производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение авиации в сельском и лесном хозяйстве / под ред. В.А. Назарова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 312 с.
2. *Асовский В.П.* Теория и практика авиационного распределения веществ. – М.: Воздушный транспорт, 2008. – 580 с.
3. *Логачев Ю.Г.* О путях повышения эффективности авиационной обработки // Механика процессов авиационного опрыскивания и рассеивания сыпучих веществ: Сб. науч. тр. – № 3. – Вып. 219. – Рига: РКИИГА, 1971. – С. 3-16.
4. *Деревянко В.С.* Влияние аэродинамических возмущений на процессы авиационного опыливания и опрыскивания. – М.: Транспорт, 1974. – 72 с.
5. *Дудник В.В.* Уменьшение вредного воздействия на окружающую среду при внесении химических веществ с сельскохозяйственных вертолетов: дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону: РД ГСХМ, 1998. – 154 с.
6. *Сулин М.А.* Землеустройство. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 448 с.
7. Рекомендации по разработке проектов внутрихозяйственного землеустройства на эколого-ландшафтной основе, РОСЗЕМКАДАСТР. Институт РосНИИземпроект. – М., 2000. – 284 с.
8. *Парамонов Е.Г., Симоненко А.П.* Основы агролесомелиорации: учеб. пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 224 с.
9. Руководство по авиационно-химическим работам гражданской авиации СССР. – М.: Воздушный транспорт, 1984. – 63 с.
10. Методические рекомендации по инвентаризации сельхозугодий на их пригодность к обработке самолетами и вертолетами при выполнении авиационно-химических работ. – М.: МГА, 1980. – 13 с.
11. *Аубакиров Т.О., Желанников А.И., Иванов П.Е., Нишит М.И.* Спутные следы и их воздействие на летательный аппарат. Моделирование на ЭВМ. – Алматы, ТОО "Мария", 1999. – 278 с.
12. *Белоцерковский Ал.С., Гиневский А.С., Погребная Т.В., Шитлов С.Д.* Моделирование дальнего вихревого следа магистральных самолетов при взлете и посадке // Успехи механики. – 2003. – № 4. – С. 106-127.

13. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы самолетов. – М.: Физматлит, 2008. – 170 с.
14. Кузьменко А.С. Использование компьютерного моделирования процессов опрыскивания в задачах повышения эффективности авиационно-химических работ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 89-104.
15. Радченко И.В., Крамчанинов В.П., Дубринский В.П. Самолет Ан-2. – М.: Транспорт, 1969. – 440 с.
16. Руководство по летной эксплуатации самолета Ан-2. – М.: Воздушный транспорт, 1984. – 199 с.
17. Указания по технологии авиационно - химических работ в сельском и лесном хозяйстве СССР. – М.: Воздушный транспорт, 1982. – 120 с.
18. Дидио Ж.Р., Фишер Л.К., Лерх М. и др. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений. – М.: Агропромиздат, 1991. – 186 с.
19. Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А. Основы химической защиты растений / под ред. профессора С.Я. Попова. – М.: Арт-Лион, 2003. – 208 с.
20. Зинченко В.А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность. – М.: КолосС, 2005. – 232 с.

REFERENCES

1. Primenenie aviatsii v sel'skom i lesnom khozyaystve [The use of aviation in agriculture and forestry], ed. by V.A. Nazarova. 2nd ed., reprint. and additional. Moscow: Transport, 1975, 312 p.
2. Asovskiy V.P. Teoriya i praktika aviatsionnogo raspredeleniya veshchestv [Theory and practice of aviation distribution of substances]. Moscow: Vozdushnyy transport, 2008, 580 p.
3. Logachev Yu.G. O putyakh povysheniya effektivnosti aviatsionnoy obrabotki [On ways to improve the efficiency of aviation processing], *Mekhanika protsessov aviatsionnoy opryskivaniya i rasseivaniya syuchikh veshchestv: Sb. nauch. tr.* [Mechanics of the processes of aircraft spraying and dispersion of bulk substances. Collection of scientific papers], No. 3, Issue 219. Riga: RKIIGA, 1971, pp. 3-16.
4. Derevyanko V.S. Vliyanie aerodinamicheskikh vozmushcheniy na protsessy aviatsionnogo opylivaniya i opryskivaniya [Influence of aerodynamic disturbances on the processes of aircraft pollination and spraying]. Moscow: Transport, 1974, 72 p.
5. Dudnik V.V. Umen'shenie vrednogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu pri vnesenii khimicheskikh veshchestv s sel'skokhozyaystvennykh vertoletov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Reduction of harmful effects on the environment when applying chemicals from agricultural heli-copters: cand. of eng. sc. diss.]. Rostov-on-Don: RD GSKHM, 1998, 154 p.
6. Sulin M.A. Zemleustroystvo [Land management]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2005, 448 p.
7. Rekomendatsii po razrabotke proektov vnutrikhozyaystvennogo zemleustroystva na ekologo-landshaftnoy osnove, ROSZEMKADASTR. Institut RosNIizemproekt [Recommendations for the development of projects of on-farm land management on an ecological and landscape basis, ROSZEMKADASTR Institute of Rosnizemproekt]. Moscow, 2000, 284 p.
8. Paramonov E.G., Simonenko A.P. Osnovy agrolesomelioratsii: ucheb. posobie [Fundamentals of agroforestry: a textbook]. Barnaul: Izd-vo AGAU, 2007, 224 p.
9. Rukovodstvo po aviatsionno-khimicheskim rabotam grazhdanskoy aviatsii SSSR [Manual on aerial - chemical works of civil aviation of the USSR]. Moscow: Vozdushnyy transport, 1984, 63 p.
10. Metodicheskie rekomendatsii po inventarizatsii sel'khozugodiy na ikh prigodnost' k obrabotke samoletami i vertoletami pri vypolnenii aviatsionno-khimicheskikh rabot [Methodical recommendations for the inventory of agricultural lands for their suitability for processing by airplanes and helicopters when performing aviation-chemical works]. Moscow: MGA, 1980, 13 p.
11. Aubakirov T.O., Zhelannikov A.I., Ivanov P.E., Nisht M.I. Sputnye sledy i ikh vozdeystvie na letatel'nyy apparat. Modelirovanie na EVM [Vortex tracks and their effect on aircraft. Computer simulation]. Almaty, TOO "Mariya", 1999, 278 p.
12. Belotserkovskiy Al.S., Ginevskiy A.S., Pogrebnaya T.V., SHipilov S.D. Modelirovanie dal'nego vikhrevoogo sleda magistral'nykh samoletov pri vzlete i posadke [Simulation of the far vortex trail of long-haul aircraft during takeoff and landing], *Uspekhi mekhaniki* [Successes of mechanics], 2003, No. 4, pp. 106-127.

13. *Ginevskiy A.S., Zhelannikov A.I. Vikhrevye sledy samoletov [Vortex traces of aircraft].* Moscow: Fizmatlit, 2008, 170 p.
14. *Kuz'menko A.S. Ispol'zovanie komp'yuternogo modelirovaniya protsessov opryskivaniya v zadachakh povysheniya effektivnosti aviatsionno-khimicheskikh rabot [The use of computer modeling of spraying processes in the tasks of increasing the efficiency of aviation chemical works],* *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences],* 2019, No. 2 (204), pp. 89-104.
15. *Radchenko I.V., Kramchaninov V.P., Dubrinskiy V.P. Samolet An-2 [Plane An-2].* Moscow: Transport, 1969, 440 p.
16. *Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii samoleta An-2 [Manual for the flight operation of the An-2 aircraft].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1984, 199 p.
17. *Ukazaniya po tekhnologii aviatsionno - khimicheskikh rabot v sel'skom i lesnom khozyaystve SSSR [Instructions on the technology of aerial - chemical works in agriculture and forestry of the USSR].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1982, 120 p.
18. *Didio Zh.R., Fisher L.K., Lerkh M. i dr. Tekhnika i tekhnologiya bezopasnogo primeneniya sredstv zashchity rasteniy [Technique and technology for the safe use of plant protection products].* Moscow: Agropromizdat, 1991, 186 p.
19. *Popov S.Ya., Dorozhkina L.A., Kalinin V.A. Osnovy khimicheskoy zashchity rasteniy [Fundamentals of chemical plant protection],* ed. by professor S.Ya. Popova. Moscow: Art-Lion, 2003, 208 p.
20. *Zinchenko V.A. Khimicheskaya zashchita rasteniy: sredstva, tekhnologiya i ekologicheskaya bezopasnost' [Chemical plant protection: means, technology and environmental safety].* Moscow: KolosS, 2005, 232 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Панатов.

Асовский Валерий Павлович – Акционерное общество научно-производственная компания «ПАНХ» (АО НПК «ПАНХ»); e-mail: vasov63@mail.ru; г. Краснодар, Россия; д.т.н.; ученый секретарь.

Кузьменко Алла Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: akuzm@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043437260; кафедра летательных аппаратов; к.т.н.; доцент.

Asovsky Valery Pavlovich – Joint Stock Company Scientific and Production Company «PANH» (JSC NPK «PANH»); e-mail: vasov63@mail.ru; Krasnodar, Russia; dr. of eng. sc.; scientific secretary.

Kuzmenko Alla Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: akuzm@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043437260; the department of aircraft; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-29-39

Д.В. Беляев, Д.Е. Губарев, К.Е. Румянцев

СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА С ОСЦИЛЛЯЦИЯМИ НА ВЕРШИНЕ МНОГОПороГОВЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЯМИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В системах автоматического измерения длительности видеоимпульсов используются различные устройства усиления и формирования импульсов нормированного уровня, длительность которых равна длительности входных сигналов. Грубое измерение длительности видеоимпульсов может производиться однопороговыми измерителями. Более точными являются многопороговые измерители и измерители с плавающим порогом. Измерители длительности импульсов нашли широкое применение в аппаратуре радиоэлектронной борьбы, в измерительной технике. Вариация формы электрических сигналов не позволяет применить единственный метод измерения, наилучший для всех форм, поэтому продолжается поиск технических решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям: широкий диапазон длительностей и скважностей. Целью работы является провести матема-

математический анализ случайной погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности. В ходе работы были получены результаты численного эксперимента по измерению длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности. А также проведено сравнение четырех многопороговых измерителей длительности для исследуемой формы импульса. Результаты расчетов представлены для динамического диапазона сигнала 60 дБ и шага квантования амплитуды 3дБ и 12 дБ.

Многопороговый измеритель; длительности импульсов; случайная погрешность; импульс с осцилляциями на вершине и срезе; шаг квантования амплитуды.

D.V. Belyaev, D.E. Gubarev, K.E. Rumyantsev

RANDOM ERROR OF PULSE DURATION MEASUREMENT WITH OSCILLATIONS AT THE TOP BY MULTI-THRESHOLD DURATION METERS

In systems for automatic measurement of the duration of video pulses, various devices for amplifying and shaping pulses of a normalized level are used, the duration of which is equal to the duration of the input signals. A rough measurement of the duration of video pulses can be made with one-threshold meters. More accurate are multi-threshold and floating-threshold meters. Pulse duration meters have found wide application in electronic warfare equipment, in measuring technology. The variation in the shape of electrical signals does not allow the use of a single measurement method, which is the best for all shapes, therefore, the search for technical solutions that satisfy the conflicting requirements continues: a wide range of durations and duty cycles. The aim of this work is to carry out a mathematical analysis of the random error in measuring the pulse duration with oscillations at the top by multi-threshold duration meters. In the course of the work, the results of a numerical experiment were obtained to measure the duration of a pulse with oscillations at the top using multi-threshold duration meters. And also a comparison was made of four multi-threshold duration meters for the investigated pulse shape. The calculation results are presented for a signal dynamic range of 60 dB and an amplitude quantization step of 3dB and 12 dB.

Multi-threshold meter; pulse duration; random error; an impulse with oscillations at the top and cut; amplitude quantization step.

Введение. Современные системы идут по пути увеличения динамического и частотного диапазонов, увеличения количества и видов применяемых сигналов, освоения нано- и пикосекундных диапазонов. В основе этих достижений лежат новые методы цифровой обработки сигналов, использование новейших изделий полупроводниковой техники. Все это позволяет создавать быстродействующие элементы, прецизионные аналоговые приборы и средства вычислительной техники, открывшие широкие возможности для реализации новых идей при построении аппаратуры [1–8].

В связи с этим, становится актуальной проблема значительного улучшения параметров комплексов освещения радиотехнической обстановки (РТО), радиомониторинга радиотехнической обстановки, необходимых для успешного обнаружения и классификации современных источников радиоизлучений.

Измерители длительности импульсов нашли широкое применение в аппаратуре радиоэлектронной борьбы, в измерительной технике. Вариация формы электрических сигналов не позволяет применить единственный метод измерения, наилучший для всех форм, поэтому продолжается поиск технических решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям: широкий диапазон длительностей и скважностей.

Целью настоящей работы является математический анализ случайной погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и срезе многопороговыми измерителями длительности.

Принцип работы многопорогового измерителя заключается в многопороговой фиксации уровня входного сигнала. Шаг квантования обычно выбирается равномерным в логарифмическом масштабе. Фронт и срез формируемых нормированных импульсов определяется алгоритмом работы многопорогового измерителя в конкретной ситуации.

Под истинной длительностью понимается длительность импульса на уровне половины амплитуды.

Так как амплитуда и форма принимаемого сигнала априорно неизвестны и могут изменяться в широких пределах, возникает погрешность формирования импульсов по длительности. Величина на этой погрешности определяется как параметрами сигнала (амплитудой, формой, длительностью фронта и среза), так и параметрами формирующего устройства (шагом квантования, динамическим диапазоном, уровнем шумов на входе пороговых устройств и д.р.).

Для измерения длительности импульсов в станциях радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы широко сейчас применяют многопороговые измерители длительности, с формированием нормированного импульса.

Поступающие на вход измерителя длительности импульсы отличаются широким многообразием форм: прямоугольные, экспоненциальные, экспоненциально-степенные, двухэкспоненциальные, гауссовские, синусные, синус-квадратные, с провалом на вершине. Случайная погрешность измерения длительности указанных импульсов многопороговыми измерителями подробно освещена в работах [6–11].

Анализ случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине. Проведем анализ случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине четырьмя типами измерителей длительности в широком динамическом диапазоне: первый измеритель (далее измеритель 1) – многопороговый измеритель длительности с формированием фронта нормированного импульса при срабатывании самого чувствительного порога, среза – при отпуске первого сверху из сработавших, второй измеритель (далее измеритель 2) формирует фронт нормированного импульса при срабатывании самого чувствительного порога, срез – при отпуске второго сверху из сработавших, третий измеритель (далее измеритель 3) – формирует нормированный импульс путем усреднения нормированных импульсов по двум средним порогам, четвертый измеритель (далее измеритель 4) формирует нормированный импульс путем усреднения нормированных импульсов по двум максимально разнесенным порогам [6]. Эпюры, поясняющие работу измерителей приведены на рис. 1.

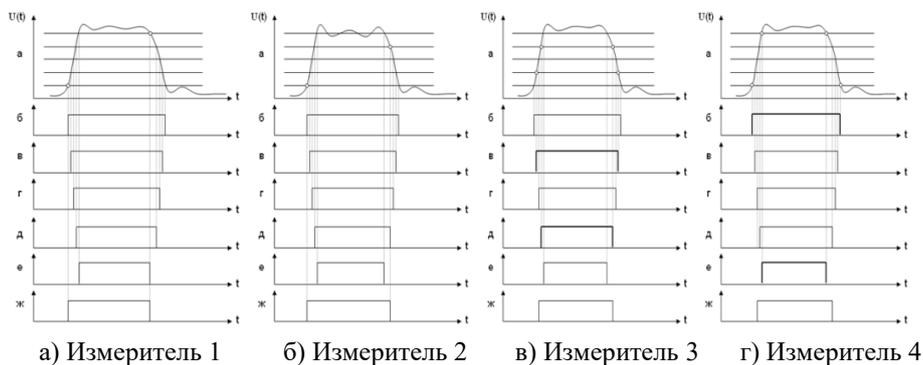


Рис. 1. Эпюры напряжений при формировании нормированного импульса формируемые многопороговыми измерителями длительности

Основным источником случайной погрешности будем рассматривать наличие шума на входе измерителя длительности, порождаемого собственными шумами тракта приемной части аппаратуры радиомониторинга или радиоэлектронной борьбы. Влияние шума на многопороговый измеритель будет сказываться в смещении временного положения моментов срабатывания и отпускания пороговых устройств. Случайную погрешность будем называть шумовой по принципу происхождения ошибки. Среднеквадратическое значение момента срабатывания порогового устройства из-за наличия шума определяется как [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ш}}{S}, \quad (1)$$

где $\sigma_{ш}$ – уровень шума на входе порогового устройства;

S – крутизна фронта импульса в окрестности порогового уровня.

Кривизна фронта (среза) импульса является производной от функции, описывающей форму импульса.

Считая шумы в области фронта и среза независимыми, получаем выражение для суммарной среднеквадратической погрешности:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 – среднеквадратическое отклонения моментов срабатывания фронта и среза соответственно.

Подставляя в (1) крутизну импульса в момент срабатывания порога $S(t_1)$ по которому формируется начало нормированного импульса, находим среднеквадратическую погрешность формирования фронта:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_1)}. \quad (3)$$

Подставляя в (1) крутизну импульса в момент срабатывания порога $S(t_2)$, находим среднеквадратическую погрешность формирования среза:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_2)}, \quad (4)$$

Подставляя (3), (4) в (2), получаем выражение для суммарной среднеквадратической погрешности формирования длительности нормированного импульса для измерителей 1 и 2:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_1)} + \frac{1}{S^2(t_2)}}. \quad (5)$$

Для измерителей 3 и 4, у которых формируются два нормированных импульса для нахождения среднего значения нормированного импульса, среднеквадратическая погрешность формирования длительности нормированного импульса будет иметь вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ш}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_1)} + \frac{1}{S^2(t_2)} + \frac{1}{S^2(t_3)} + \frac{1}{S^2(t_4)}}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что погрешность формирования длительности нормированного импульса, вызванная наличием шума на входе многопорогового измерителя, зависит только от уровня входного шума и крутизны фронта и среза измеряемого импульса. Среднеквадратическое значение погрешности формирования нормированного импульса прямо пропорционально среднеквадратиче-

скому значению шума на входе и уменьшается с увеличением крутизны фронта и среза импульса. Полученные выражения (5) и (6) позволяют провести анализ зависимости среднеквадратического отклонения длительности нормированного импульса от крутизны фронта и среза измеряемого импульса и, следовательно, от его формы.

Рассмотрим импульс с осцилляциями на вершине наложенные на трапецевидальный импульс. Форма такого импульса представлена на рис. 2 [6–8]. Импульс описывается выражением (7):

$$F(t) := \begin{cases} \frac{U_{mm}}{\tau_f} t & \text{if } 0 \leq t < \tau_f \\ U_{mm} \cdot \left(1 + \frac{\sin(60\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - \text{shir} t)}{2} \right) & \text{if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ \frac{U_{mm}}{\tau_s} (\tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s - t) & \text{if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \\ U_{mm} \cdot 3000 \cdot (\cos(55\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - \text{shir} t)) & \text{if } t \geq \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases} \quad (7)$$

где $F(t)$ – форма импульса;
 U_{mm} – амплитуда импульса;
 τ_f – длительность фронта;
 τ_s – длительность среза;
 τ_{ist} – истинная длительность импульса по уровню половинной амплитуды;
 ampas – амплитуда осцилляции на вершине;
 shir – ширина осцилляций на вершине.

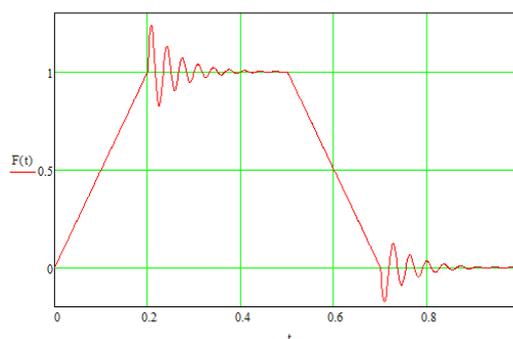


Рис. 2. Форма импульса с осцилляциями на вершине и после среза

Производная будет иметь вид (8):

$$S(t) = F'(t) = \begin{cases} \frac{U_{m_w}}{\tau_f} & \text{if } 0 \leq t < \tau_f \\ 30 \cdot \text{pp} \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \cos(60 \cdot \text{pp} \cdot x) \cdot U_{m_w} - \frac{\text{shir} \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \sin(60 \cdot \text{pp} \cdot x) \cdot U_{m_w}}{2} & \text{if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ -\frac{U_{m_w}}{\tau_s} & \text{if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases} \quad (8)$$

Очевидно, что осцилляция после среза не будет участвовать в расчетах, поскольку она не влияет на формирование нормированного импульса многопороговыми измерителями.

Расчет случайной погрешности измерения длительности проводился в программе MathCad численными методами для амплитуд исходного сигнала от 0 дБ, соответствующих максимальной амплитуде, до минус 60 дБ, при шаге установки порога порога 3дБ и 12 дБ. Уровень шума в расчете принимался равным минус 60 дБ [9–15].

На рис. 3, 4, 6–10 представлены зависимости систематических погрешностей измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине измерителями 1–4 при шаге квантования 3 дБ и 12 дБ.

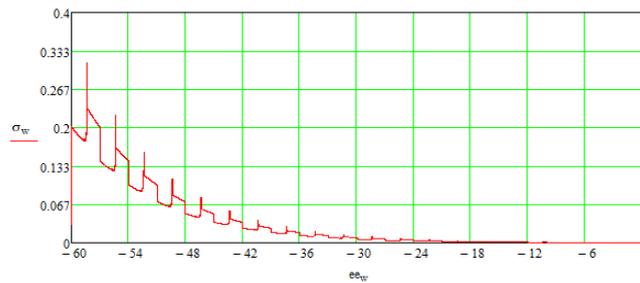


Рис. 3. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ для измерителя 1

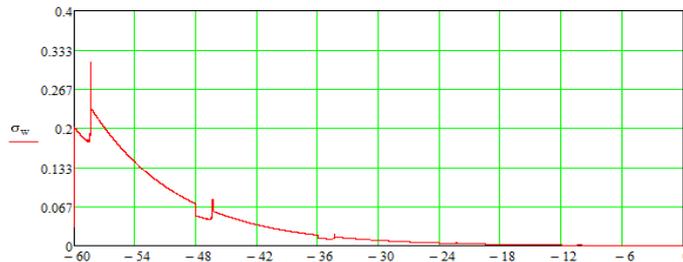


Рис. 4. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ для измерителя 1

Из рис. 3 и 4 видно, что максимальное значение случайной (шумовой) ошибки (ШО) измерения длительности измерителем 1 импульса с осцилляциями на вершине составляет 24 % при минимальном уровне сигнала и ступенчато спадает до нуля при увеличении амплитуды сигнала. При этом ШО имеет выбросы до 30%, при минимальном уровне сигнала.

Формирование выбросов на шумовой ошибке в зоне амплитуд до минус 42 дБ на рис. 3 и 4 обусловлены попаданием момента срабатывания верхнего порога измерителя на первый выброс осцилляции на вершине импульса – зону с минимальной крутизной, рис. 5.

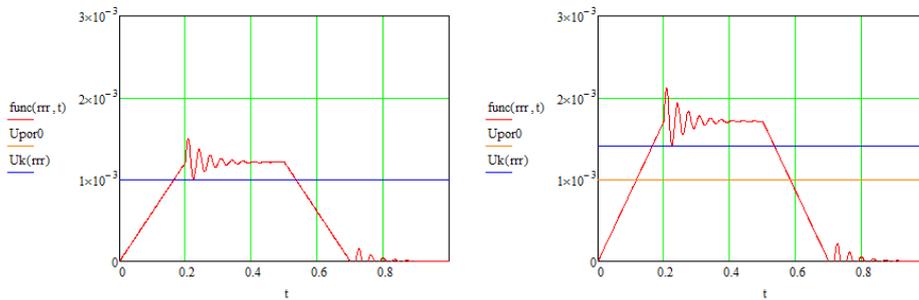


Рис. 5. Попадание максимального порога на осцилляции с минимальным наклоном при различных амплитудах сигнала

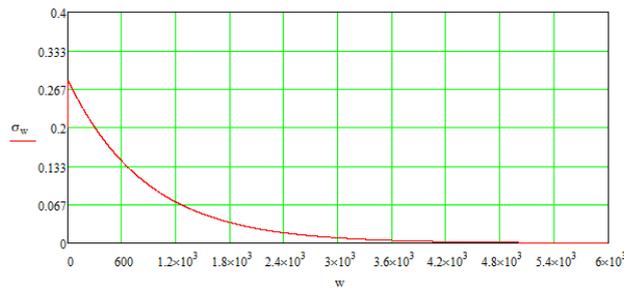


Рис. 6. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ и 12 дБ для измерителя 2

Максимальное значение случайной (шумовой) ошибки (ШО) измерения длительности измерителем 2 импульса с осцилляциями на вершине составляет не зависит от шага квантования и составляет 29 % при малых сигналах и монотонно уменьшается до нуля при увеличении амплитуды сигнала.

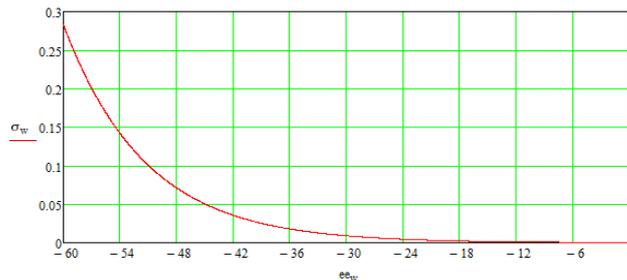


Рис. 7. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ и 12 дБ для измерителя 3

Случайная (шумовая) ошибка (ШО) измерения длительности измерителем 3 аналогична измерителю 2 и составляет около 27 % при минимальных уровнях сигнала и монотонно уменьшается при увеличении амплитуд сигнала. Отсутствие выбросов на графиках 6 и 7 объясняется не попаданием моментов срабатывания порогов на осцилляции на вершине.

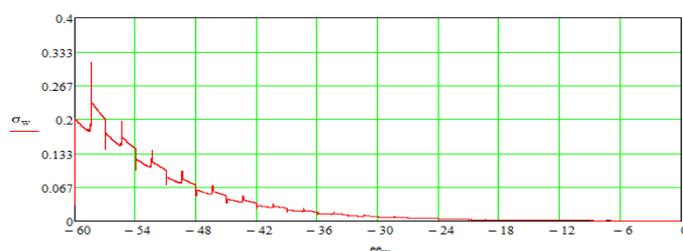


Рис. 9. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ для измерителя 4

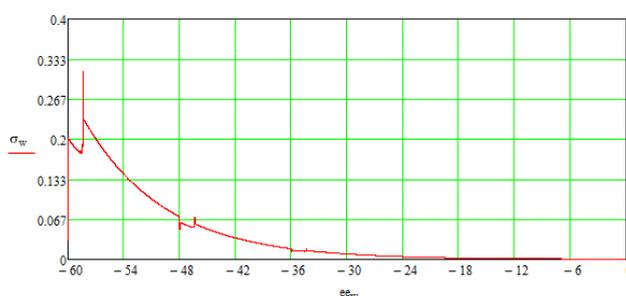


Рис. 10. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ для измерителя 4

Случайная (шумовая) ошибка (ШО) измерения длительности измерителем 4 составляет от 24 % и ступенчато уменьшается до 0 %. Принцип формирования выбросов в зоне малых амплитуд аналогичен первому измерителю. При проведении данного исследования были использованы источники [16–25].

Заключение. Случайная (шумовая) ошибка (ШО) при измерении длительности четырьмя многопороговыми измерителями монотонно уменьшается от 24 % до 0% при увеличении амплитуды сигнала. Выбросы ШО обусловлены попаданием моментов срабатывания порогов на зоны сигнала с малой крутизной, а их положение определяется принципом формирования нормированного импульса конкретным измерителем. Максимальные значения выбросов появляются при работе по сигналу с малой амплитудой соизмеримой с величиной шума.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов И.Е., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов.радио, 1978. – 296 с.
2. Памазанов А.В., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Дикарев Б.Д. Оценка параметров сигналов: учеб. пособие. Ч. 1. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 57 с.
3. Зорин Р.Л. Анализ шумовых ошибок многопорогового усилителя-формирователя длительности импульсов: Сб. трудов СКНЦВШ, г. Ростов-на-Дону, 2000 г.
4. Памазанов А.В., Зорин Р.Л. Оценка временных параметров радиосигнала акустооптическим измерителем // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2002. – Т. 45, № 3. – С. 63-67.
5. Дикарев Б.Д., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Памазанов А.В. Исследование шумовых ошибок усилителя-формирователя импульсов // В сб. «Радиоэлектронные технологии информационной безопасности» / под ред. К.Е. Румянцев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – С. 78-81.

6. Патент РФ №2.399. 922. Устройство измерения длительности импульсов по двум уровням / *Беляев Д.В., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Румянцев К.Е., Черкасов В.И.* Оpubл. 20.09.2010, Б.И. №26.
7. *Tsui J.V.Y.* Microwave Receivers with Electronic Warfare Application. – Wiley-Interscience Publication, 1986. – 460 p.
8. *Розенберг В.Я.* Введение в теорию точности измерительных систем. – М.: Сов. радио, 1975. – 304 с.
9. *Иццоки Я.С., Овчинников Н.И.* Импульсные и цифровые устройства. – М.: Сов. радио, 1973. – 592 с.
10. Аппаратура для частотных и временных измерений. – М.: Сов. радио, 1971. – 336 с.
11. *Никитенко Ю.И., Орловская С.Э.* Прохождение экспоненциально-степенных импульсов через резонансный усилитель с одиночными контурами // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. XII. – 1963. – Вып. № 29.
12. *Поляков П.Ф.* Широкополосные аналоговые системы связи со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1981. – 153 с.
13. *Тузов И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.* Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
14. *Зенькович А.В.* Искажения частотно-модулированных колебаний. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
15. *Дятлов А.П., Дятлов П.А.* Анализ и моделирование обнаружителей сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 82 с.
16. *Дятлов А.П.* Обнаружители и измерители параметров сигналов в радиоконтроле: учеб. пособие. 4.1. – Таганрог: ТРТИ, 1993. – 85 с.
17. *Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х.* Многофункциональное автокорреляционное устройство с квадратурной обработкой информации // Радиосистемы. – 2002. – Вып. 62. – С. 3-9.
18. *Дятлов А.П., Дятлов П.А., Мамонтов К.А.* Радиомониторинг слабых широкополосных частотно-модулированных сигналов // Телекоммуникации. – 2004. – № 8. – С. 45-49.
19. *Мамонтов К.А.* Алгоритмы и структуры автокорреляционных частотных дискриминаторов // Сб. научных статей "Современные проблемы теории радиотехнических сигналов, цепей и систем". – Таганрог: ТРТУ, 2004.
20. *Broderick P.* Effect of Distortion on the Bessel-Zero Method of Frequency Modulation Measurements // "Proc. IEE", Electronics Record. – 1966. – Vol. 113, No. 5. – P. 740.
21. *Alongi A.V.* Short-pulse and wide-bandwidth high-resolution radars // In: Atmospheric effects on radar target identification and imaging. – Dordrecht - Boston, 1976. – P. 83-156.
22. Аппаратура для частотных и временных измерений / под ред. А.П. Горшкова. – М.: Сов. радио, 1971. – 336 с.
23. *Кантор Л.Я., Дорофеев В.М.* Помехоустойчивость приема ЧМ сигналов. – М.: Связь, 1977. – 335 с.
24. Многофункциональные комплексы радиоконтроля и выявления каналов утечки информации (перевод). – М.: Иностранная печать. Серия "ТСР служб зарубежных государств", ВИНТИ. – 2001. – № 12. – С. 35-37.
25. Приемники предупреждения о радиолокационном облучении (перевод). – М.: Иностранная печать. Серия "ТСР служб зарубежных государств", ВИНТИ. – 2001. – № 2. – С. 14-20.

REFERENCES

1. *Kulikov I.E., Trifonov A.P.* Otsenka parametrov signalov na fone pomekh [Estimation of parameters of signals against the background of interference]. Moscow: Sov.radio, 1978, 296 p.
2. *Patazanov A.V., Zikiy A.N., Zorin R.L., Dikarev B.D.* Otsenka parametrov signalov: ucheb. posobie [Estimation of signal parameters: tutorial. Part 1]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 57 p.
3. *Zorin R.L.* Analiz shumovykh oshibok mnogoporogovogo usilitelya-formirovatelya dli-tel'nosti impul'sov: Sb. trudov SKNTSVSh, g. Rostov-na-Donu, 2000 g. [Analysis of noise errors of a multi-threshold amplifier-pulse duration shaper. Collection of works of SKNTSVSh. Rostov-on-Don, 2000].

4. Pomazanov A.V., Zorin R.L. Otsenka vremennykh parametrov radiosignala akustoopticheskim izmeritelem [Estimation of the time parameters of the radio signal with an acousto-optic meter], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika* [Proceedings of higher educational institutions. Radioelectronics], 2002, Vol. 45, No. 3, pp. 63-67.
5. Dikarev B.D., Zikiy A.N., Zorin R.L., Pomazanov A.V. Issledovanie shumovykh oshibok usilitelya-formirovatelya impul'sov [Investigation of noise errors of the amplifier-shaper of impulses], *V sb. «Radioelektronnye tekhnologii informatsionnoy bezopasnosti»* [In the collection "Radio-electronic technologies of information security"], ed. by K.E. Rumyantsev. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, pp. 78-81.
6. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Zorin R.L., Rumyantsev K.E., Cherkasov V.I. Patent RF No. 2.399.922. Ustroystvo izmereniya dlitel'nosti impul'sov po dvum urovnyam [Device for measuring pulse duration at two levels], Publ. 09/20/2010, B.I. No. 26.
7. Tsui J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Application. Wiley-Interscience Publication, 1986, 460 p.
8. Rozenberg V.Ya. Vvedenie v teoriyu tochnosti izmeritel'nykh system [Introduction to the theory of accuracy of measuring systems]. Moscow: Sov. radio, 1975, 304 p.
9. Itskhoki Ya.S., Ovchinnikov N.I. Impul'snye i tsifrovye ustroystva [Pulse and digital devices]. Moscow: Sov. radio, 1973, 592 p.
10. Apparatura dlya chastotnykh i vremennykh izmereniy [Equipment for frequency and time measurements]. Moscow: Sov. radio, 1971, 336 p.
11. Nikitenko Yu.I., Orlovskaya S.E. Prokhozhdenie eksponentsial'no-stepennykh impul'sov cherez rezonansnyy usilitel' s odinochnymi konturami [Passage of exponential-power-law pulses through a resonant amplifier with single circuits], *Voprosy radioelektroniki* [Problems of Radioelectronics]. Ser. XII, 1963, Issue No. 29.
12. Polyakov P.F. SHirokopolosnye analogovye sistemy svyazi so slozhnymi signalami [Broadband analog communication systems with complex signals]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 153 p.
13. Tuzov I., Sivov V.A., Prytkov V.I. i dr. Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami [Interference immunity of radio systems with complex signals], ed. by G.I. Tuzova. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 264 p.
14. Zen'kovich A.V. Iskazheniya chastotno-modulirovannykh kolebaniy [Distortion of frequency modulated oscillations]. Moscow: Sov. radio, 1974, 296 p.
15. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A. Analiz i modelirovanie obnaruzhiteley signalov: Metodicheskie ukazaniya k laboratorno-prakticheskim zanyatiyam [Analysis and modeling of signal detectors: Methodical instructions for laboratory and practical exercises]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, 82 p.
16. Dyatlov A.P. Obnaruzhiteli i izmeriteli parametrov signalov v radiokontrole: ucheb. posobie. 4.1 [Detectors and Meters of Signal Parameters in Radio Monitoring: Tutorial. 4.1.]. Taganrog: TRTI, 1993, 85 p.
17. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Kul'bikayan B.Kh. Mnogofunktsional'noe avtokorrelatsionnoe ustroystvo s kvadratnoy obrabotkoy informatsii [Radio monitoring of weak broadband frequency-modulated signals], *Radiosistemy* [Radio systems], 2002, Issue 62, pp. 3-9.
18. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Mamontov K.A. Radiomonitoring slabykh shirokopolosnykh chastotno-modulirovannykh signalov [Radio monitoring of weak broadband frequency-modulated signals], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2004, No. 8, pp. 45-49.
19. Mamontov K.A. Algoritmy i struktury avtokorrelatsionnykh chastotnykh diskriminatorov [Algorithms and structures of autocorrelation frequency discriminators], *Sb. nauchnykh statey "Sovremennye problemy teorii radiotekhnicheskikh signalov, tsepey i sistem"* [Collection of scientific articles "Modern problems of the theory of radio-technical signals, circuits and systems"]. Taganrog: TRTU, 2004.
20. Broderick P. Effect of Distortion on the Bessel-Zero Method of Frequency Modulation Measurements, "*Proc. IEE*", *Electronics Record*, 1966, Vol. 113, No. 5, pp. 740.
21. Alongi A.V. Short-pulse and wide-bandwidth high-resolution radars, *In: Atmospheric effects on radar target identification and imaging*. Dordrecht - Boston, 1976, pp. 83-156.
22. Apparatura dlya chastotnykh i vremennykh izmereniy [Equipment for frequency and time measurements], ed. by A.P. Gorshkova. Moscow: Sov. radio, 1971, 336 p.

23. Kantor L.Ya., Dorofeev V.M. Pomekhoustoychivost' priema ChM signalov [Immunity of receiving FM signals. Moscow: Svyaz', 1977, 335 p.
24. Mnogofunktional'nye komplekсы radiokontrolya i vyyavleniya kanalov utechki informatsii (perevod) [Multifunctional complexes for radio monitoring and detection of information leakage channels (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 12, pp. 35-37.
25. Priemniki preduprezhdeniya o radiolokatsionnom obluchenii (perevod) [Receivers of warning about radar exposure (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 2, pp. 14-20.

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

Беляев Денис Владимирович – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник подразделения.

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра АиРПУ. аспирант.

Румянцев Константин Евгеньевич – e-mail: rke2004@mail.ru; зав. кафедрой ИБКТС; д.т.н.; профессор.

Belyaev Denis Vladimirovich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of department.

Gubarev Dmitriy Egorovich – Southern Federal University; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; Taganrog, Russia; postgraduate student.

Rumyantsev Konstantin Evgenevich – e-mail: rke2004@mail.ru; head of the department of IBKTS; dr. of eng.sc.; professor .

УДК 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-39-49

А.И. Комиссаров, К.Е. Бяков, В.Б. Холоденко, О.А. Корниенко

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФИЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ДВУХЗВЕННОГО ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА

Способность многозвенного внутритрубного робота преодолевать изогнутые участки трубопроводов является важным показателем его профильной проходимости. Оценка данного показателя на этапе проектирования невозможна без проведения математического моделирования процесса пространственного движения робота с учетом силового взаимодействия движителей робота с трубопроводом. Целью данной работы является создание динамической модели для оценки профильной проходимости двухзвенного внутритрубного робота с колесными движителями. Разработка модели проводилась в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» с использованием стандартных элементов описания механических систем и специально разработанной модели контактного взаимодействия колесных движителей робота с внутренней поверхностью трубопровода. Модель контактного взаимодействия колес с трубопроводом была создана в среде MATLAB и скомпилирована в динамически подключаемую библиотеку. Полученная динамическая модель верифицировалась по качественному поведению робота при движении через изогнутый участок трубопровода и графикам индикаторов профильной проходимости. Рассматривалось два варианта направления изгиба трубопровода. В качестве индикатора профильной проходимости было предложено использование минимального расстояния от выступающих электродвигателей актуаторов робота до внутренней поверхности трубопровода. Анализ результатов математиче-

ского моделирования подтвердил адекватность поведения модели и показал, что разработанная динамическая модель может применяться для оценки профильной проходимости внутритрубного двухзвенного робота на ранних этапах проектирования до изготовления его натурного образца.

Внутритрубный робот; модель контакта колесо–трубопровод; профильная проходимость внутритрубного робота.

A.I. Komissarov, K.E. Byakov, V.B. Kholodenko, O.A. Kornienko

DEVELOPMENT OF THE MULTIBODY MODEL OF A TWO-UNIT IN-PIPE ROBOT FOR EVALUATION OF ITS CAPABILITY TO MOVE THROUGH A PIPELINE

The ability of a multi-unit in-pipe robot to drive through curved sections of a pipeline is an important indicator of its capability to move through the pipeline. At the design stage, this indicator cannot be verified without mathematical simulation of the robot spatial movement and interaction of its running gear with the pipeline. The objective of this work is to create a dynamical model for evaluation of the two-link in-pipe wheeled robot capability to drive through a pipeline. The model was developed in the Universal Mechanism multibody system simulation program with the use of its standard elements of the mechanical system modeling and a special-purpose wheel – pipeline contact model developed by the authors. The wheel – pipeline contact model was created in MATLAB and compiled as a DLL. The developed multibody model was verified by the robot behavior during its motion through a bent section of the pipeline and by the time histories of the indicators of its capability to drive through the pipeline. Two directions of the pipeline bend were studied. The minimum distance from the extruding electric motors of the robot actuators to the internal surface of the pipeline has been offered as an indicator of the robot ability to move through the pipeline. The analysis of the simulation results has proved the adequacy of the model behavior and showed that the developed multibody model can be used for the evaluation of the robot capability to move through the pipeline at the early design stages before fabrication of its prototype.

In-pipe robot; wheel–pipeline contact model; in-pipe robot capability to drive through a pipeline.

Введение. Одним из технических требований к профильной проходимости многозвенного внутритрубного робота является способность преодолевать изогнутые участки трубопровода. Учитывая большое число звеньев робота, пространственный характер и множество точек потенциального контактного взаимодействия элементов робота с трубопроводом и между собой, оценку профильной проходимости робота на этапе проектирования невозможно выполнить без проведения математического моделирования процесса его движения через изогнутые участки трубопровода с учетом силового взаимодействия движителей робота с трубопроводом [1–13]. Целесообразно для решения данной задачи использовать один из программных комплексов автоматизированного динамического анализа систем тел [14–17]. Подобные программные комплексы автоматически формируют уравнения движения механической системы, описанной в виде набора тел, шарниров и силовых взаимодействий и позволяют проводить их решение численными методами, эффективными для жестких задач, к которым обычно относятся задачи контактного взаимодействия. В состав таких комплексов входят библиотеки готовых моделей контактных взаимодействий различных геометрических фигур, а также в них имеется возможность использования готовых моделей взаимодействия колесных движителей с различными неровностями. Однако, как показал проведенный анализ библиотек ряда программных комплексов и существующих моделей взаимодействия колесных движителей [18–20] с неровностями, модели, пригодные для описания взаимодействия элементов робота с замкнутой внутренней поверхностью изогнутого участка трубопровода, либо отсутствуют, либо имеют существенные ограничения по допустимой форме трубопровода. В связи с этим актуаль-

ной задачей является создание специальной модели контактного взаимодействия движителя робота с трубопроводом на одном из языков программирования и ее подключение к модели робота в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел в виде динамически подключаемой библиотеки.

В данной работе описывается динамическая модель двухзвенного внутри-трубного робота для оценки профильной проходимости, созданная в российском программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» с использованием авторской модели контактного взаимодействия движителей робота с внутренней поверхностью трубопровода, и приводится пример ее применения.

Динамическая модель ведущего модуля. В данном исследовании внутри-трубный робот представлял собой комбинацию из двух последовательно расположенных одинаковых ведущих модулей, соединенных сцепным устройством. Динамическая модель ведущего модуля приведена на рис. 1–3.

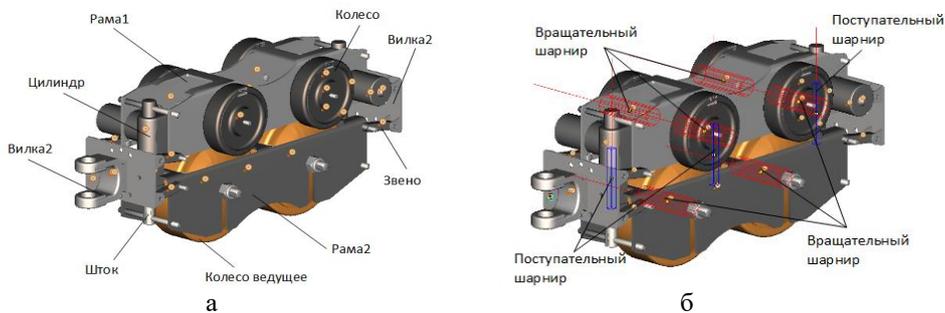


Рис. 1. Динамическая модель ведущего модуля:
а – тела модели; б – шарниры модели

Площадки вилок крепятся к каждой раме модуля робота через два звена на вращательных шарнирах. Во избежание возникновения статической неопределенности эти кинематические связи заменены линейными силовыми, показанными на рис. 2.

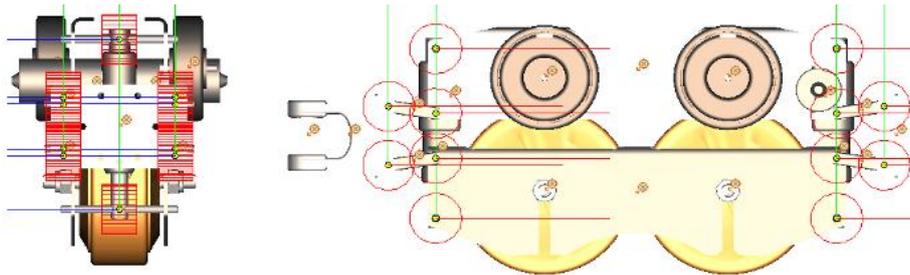


Рис. 2. Силовые элементы динамической модели ведущего модуля

В модели учитывается контактное взаимодействие площадок вилок с рамами модуля при помощи силовых контактных элементов *Точки – Плоскость*, как показано на рис. 3.

Контакт вилок сцепного устройства со сцепкой моделируется при помощи силовых контактных элементов *Точки – Плоскость*, показанных на рис. 4,б. Принятые в модели значения основных параметров контактного взаимодействия приведены в табл. 1.

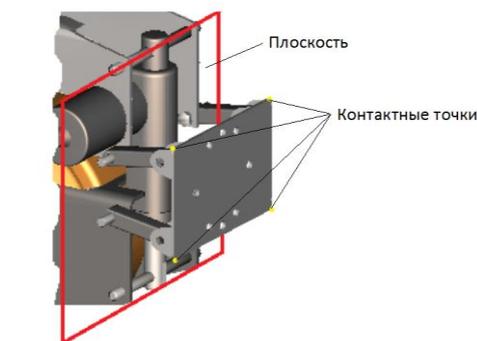


Рис. 3. Контактные силовые элементы динамической модели ведущего модуля

Динамическая модель сцепного устройства показана на рис. 4.

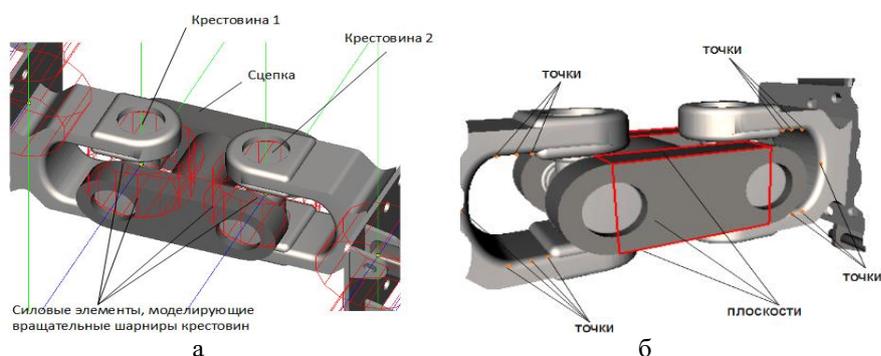


Рис. 4. Динамическая модель сцепного устройства: а – тела и силовые элементы; б – контактные силовые элементы

Таблица 1

Основные параметры контактных элементов *Точки – Плоскость*

Параметр	Значение
Коэффициент контактной жесткости c , Н/м	1e8
Коэффициент линейно-вязкого трения, Н с/м	1e5
Коэффициент трения, f_s	0.25

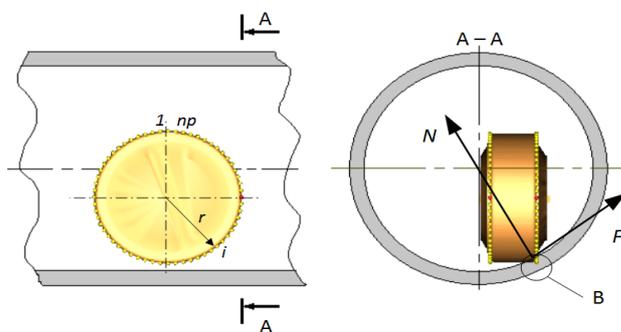


Рис. 5. Модель взаимодействия колеса с внутренней поверхностью трубопровода

На объекте исследования применены колеса из сплошного упругого материала. Взаимодействие такого колеса с внутренней поверхностью трубопровода в рамках задачи анализа профильной проходимости робота может быть описано при помощи модели контактного взаимодействия типа *точка – поверхность* с линейными характеристиками. С этой целью на двух кромках габаритного цилиндра колеса радиусом r задается по np точек, равномерно расположенных по окружности кромок, как показано на рисунке 5. Для каждой точки C_i в контакте с поверхностью трубопровода вычисляются нормальная сила N и сила трения F (см. рис. 5):

$$N = c \cdot d + b \cdot d',$$

где c – коэффициент контактной жесткости точки контакта; b – коэффициент линейно-вязкого трения точки контакта; d – нормальная деформация в точке контакта; d' – скорость нормальной деформации в точке контакта;

$$F = - \text{sign}(v_s) \cdot N \cdot f_s,$$

где v_s – скорость скольжения точки контакта относительно поверхности трубопровода; f_s – коэффициент трения скольжения для пары *материал колеса – материал трубопровода*.

Параметры модели контактного взаимодействия подбираются на основании экспериментальных данных по обжатию и прокатыванию колеса в трубопроводе. Значения параметров контактного взаимодействия, принятые в данной работе, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры контактного взаимодействия точки колеса с поверхностью трубопровода

Параметр	Значение
Коэффициент контактной жесткости c , Н/м	75000
Коэффициент линейно-вязкого трения, Н с/м	100
Число точек на окружности, np	121
Коэффициент трения пары <i>материал колеса – материал трубопровода</i> , f_s	0.3

Данная модель взаимодействия движителя с трубопроводом реализована в программном комплексе MATLAB\Simulink и скомпилирована в динамически-подключаемую библиотеку, которая подключалась к динамической модели робота в программном комплексе автоматизированного анализа систем тел «Универсальный механизм».

Управление продольной скоростью ведущего модуля. Управление скоростью модуля робота производилось по модели пропорционального регулятора, изменявшего крутящий момент ведущего колеса по формуле:

$$M_i = s_acc(e_v) \cdot M(n_i),$$

где $M(n_i)$ – зависимость момента i -го электродвигателя ведущего колеса от скорости n_i вращения ротора $s_acc(e_v)$ – зависимость управляющего сигнала электродвигателя от ошибки e_v регулирования.

Ошибка регулирования продольной скорости вычислялась по формуле:

$$e_v = V0 - Vx,$$

где $V0$ – требуемая скорость ведущего модуля; Vx – текущая скорость точки O нижней рамы в проекции на продольную ось нижней рамы.

Моделирование движения внутритрубного робота в изогнутом участке трубопровода. Для демонстрации пригодности созданной модели внутритрубного робота для оценки профильной проходимости проводилось моделирование его движения со скоростью 0.1 м/с в изогнутом участке трубопровода с осевым радиусом R гиба трубы, равным двум внутренним диаметрам $D = 320$ мм. Схема участка трубопровода приведена на рис. 6.

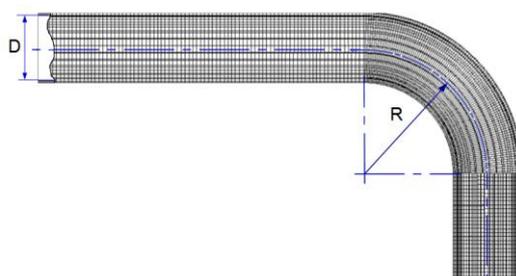


Рис. 6. Схема изогнутого участка трубопровода. Вид сверху

При этом рассматривалось два варианта направления изгиба трубопровода: вправо (как показано на рис. 6) и влево (зеркально отраженный вариант рис. 6). Использовались взаимные расположения модулей робота, показанное на рис. 7. Расстояние между осями ведущих колес и колес рамы 1 задавалось из условия обеспечения на четырех колесах рамы 1 вертикальных (для переднего модуля) или боковых (для заднего модуля) реакций, равных в сумме весу модуля.

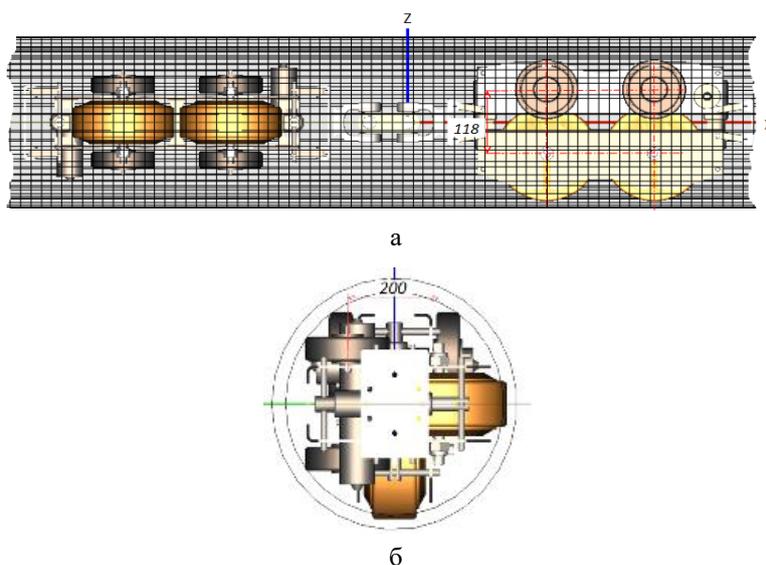


Рис. 7. Конфигурация двухзвенного робота: задний по ходу модуль повернут относительно переднего модуля на 180° вокруг оси Z и на 90° вокруг оси X :
а – вид справа; б – вид сзади

Профильная проходимость робота на изогнутом участке трубопровода ограничивается при задевании поверхности трубопровода выступающими элементами модулей робота. Наиболее опасной с точки зрения прочности робота является си-

туация задевания трубопровода двигателями актуаторов поступательного перемещения рам модулей. Поэтому в качестве индикатора способности преодоления изогнутого участка выбран неотрицательный минимум расстояния от корпусов электродвигателей актуаторов до внутренней поверхности трубопровода в процессе движения. В качестве расстояния от корпуса электродвигателя актуатора до поверхности трубопровода в данном исследовании принималось минимальное расстояние от окружности кромки внешнего торца габаритного цилиндра корпуса электродвигателя до поверхности трубопровода.

В табл. 3 приведены минимумы расстояний от корпусов электродвигателей актуаторов до трубопровода, полученные в результате моделирования.

Таблица 3

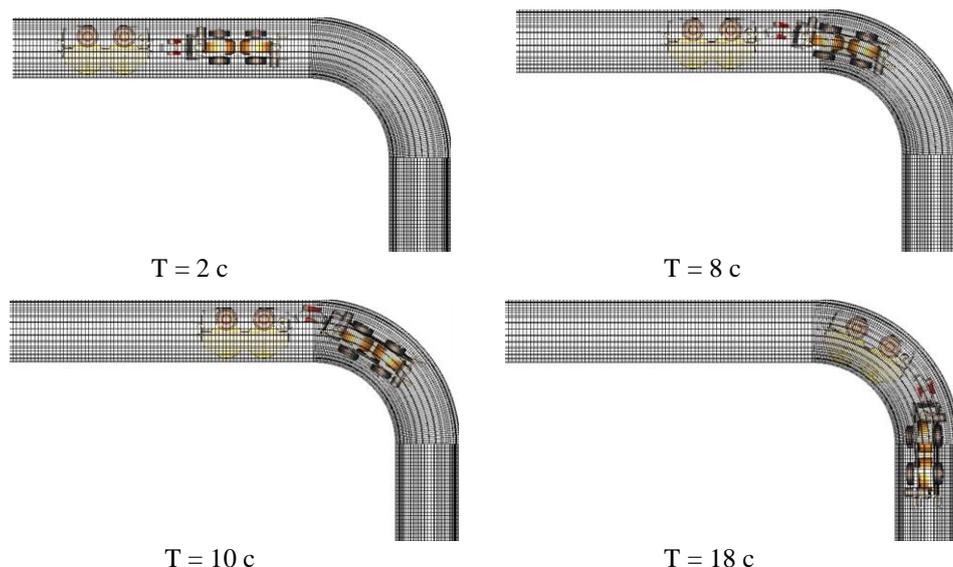
Минимумы расстояний от электродвигателей актуаторов до внутренней поверхности трубопровода при движении через изогнутый участок

Параметр	Изгиб трубопровода вправо	Изгиб трубопровода влево
Минимальное расстояние от актуатора до трубопровода, мм	6	-1

Из таблицы видно, что при изгибе трубопровода вправо задевания отсутствуют, и имеется положительный запас по расстоянию до трубопровода. При изгибе трубопровода влево происходит задевание его поверхности (запас по расстоянию до трубопровода отрицательный).

На рис. 8 приведены кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода, а на рис. 9 – графики изменения расстояний от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов для случая изгиба трубопровода вправо.

На рис. 10 приведены кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода, а на рис. 11 – графики изменения расстояний от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов для случая изгиба трубопровода влево. Из графиков рис. 12 видно, что задевание происходит электродвигателем первого по ходу актуатора переднего модуля.



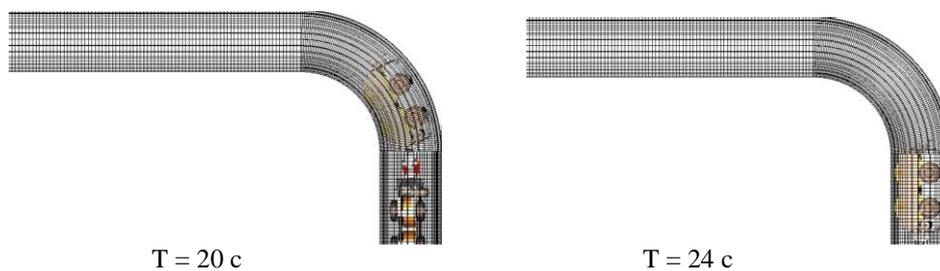


Рис. 8. Кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусом гиба $R = 2 \cdot D$. Поворот вправо

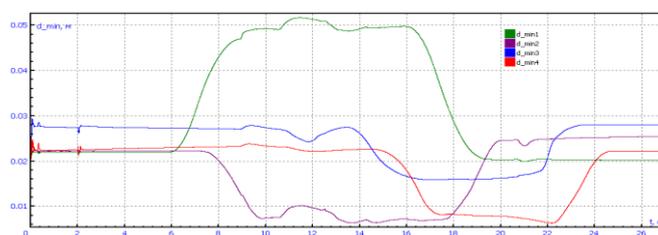


Рис. 9. Расстояния от кромок внешних торцев электродвигателей актуаторов при движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусом гиба $R = 2 \cdot D$. Актуаторы пронумерованы против хода движения робота

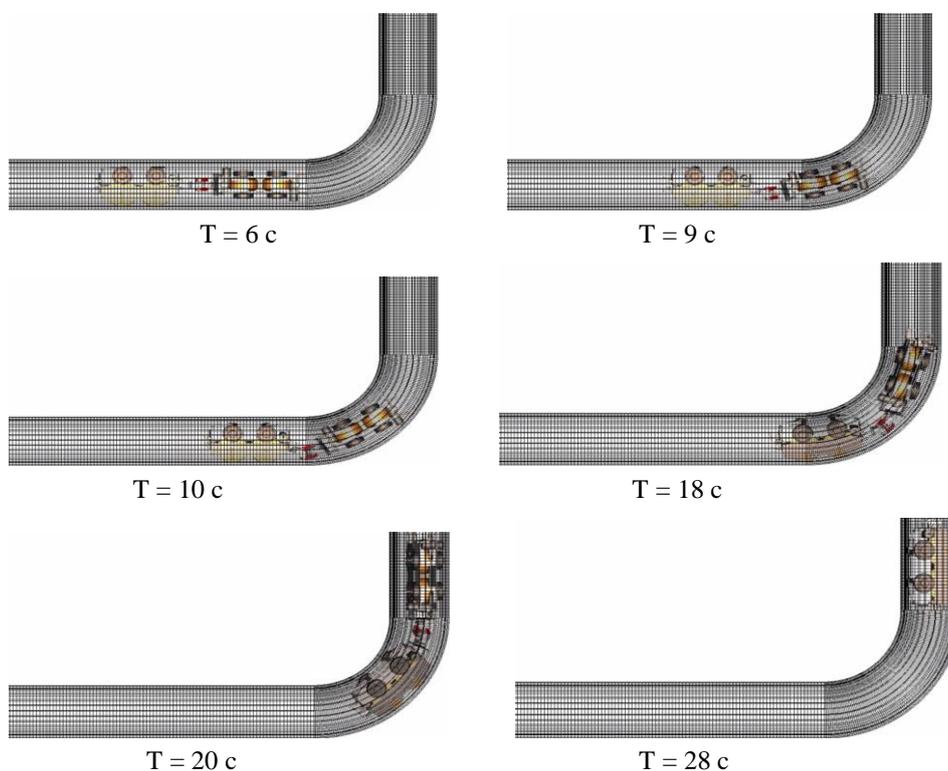


Рис. 10. Кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусом гиба $R = 2 \cdot D$. Поворот влево

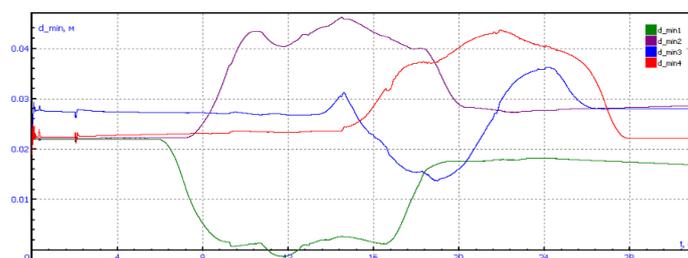


Рис. 11. Расстояния от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов при движения робота в изогнутом влево участке трубопровода с радиусомгиба $R = 2 \cdot D$. Актуаторы пронумерованы против хода движения

Заключение. Разработанная динамическая модель двухзвенного внутри-трубного робота с колесными движителями позволяет проводить оценку профильной проходимости на изогнутом участке трубопровода на ранних этапах проектирования, предшествующих изготовлению образца робота. Данная модель также может быть в дальнейшем использована для оптимизации конфигурации модулей робота и отработки алгоритмов управления ведущими колесами и актуаторами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Golubkin I.A., Antonov O.V. Research and modeling of gas pipeline inspection by mobile wheeled robot // Vestnik of astrakhan state technical university. Series: Management, Computer Science & Informatics. – 2014. – No. 2.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 113. – P. 02016.
3. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2017. – P. 1-6.
4. Kim H.M. et al. Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2016. – Vol. 22, No. 1. – P. 227-235.
5. Kazeminasab S. et al. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems // 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2021. – Vol. 1. – P. 39-46.
6. Jung C.D. et al. Optimal mechanism design of in-pipe cleaning robot // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – IEEE, 2011. – P. 1327-1332.
7. Nguyen T.T. et al. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline // Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No. 01EX515). – IEEE, 2001. – P. 492-497.
8. Hu Z., Appleton E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. – Vol. 21, No. 5. – P. 781-789.
9. Mirshamsi M., Rafeeyan M. Dynamic Analysis of Pig through Two and Three Dimensional Gas Pipeline // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2015. – Vol. 8, No. 1.
10. Kwon Y.S. et al. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – P. 5141-5146.
11. Zhang L., Wang X. Stable motion analysis and verification of a radial adjustable pipeline robot // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – IEEE, 2016. – P. 1023-1028.
12. Shi Y., Tang D. Adaptive control characteristics of pipeline inspection traction device // Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science). – 2012.
13. Hong Z., Yang W. Development of an Adaptive Vehicle for In-Pipe Inspection Task // ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines. – 2011. – P. 1081-1089.
14. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. – Режим доступа: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 24.07.2021). Заглавие с экрана.

15. EULER – программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем. – Режим доступа: <http://www.euler.ru> (дата обращения 24.07.2021). Заглавие с экрана.
16. ФРУНД. – Режим доступа: <http://frund.vstu.ru/> (дата обращения: 10.11.2021). Заглавие с экрана.
17. Adams. The Multibody Dynamics Simulation Solution. – Режим доступа: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 24.07.2021). Заглавие с экрана.
18. Gorelov V.A., Komissarov A.I. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1322-1328.
19. Gipser M. FTire—the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics // *Vehicle System Dynamics*. – 2007. – Vol. 45, No. S1. – P. 139-151.
20. Besselink I.J. M. et al. The SWIFT tyre model: overview and applications. – 2004. – P. 525-530.

REFERENCES

1. Golubkin I.A., Antonov O.V. Research and modeling of gas pipeline inspection by mobile wheeled robot, *Vestnik of astrakhan state technical university. Series: Management, Computer Science & Informatics*, 2014, No. 2.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes, *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, Vol. 113, pp. 02016.
3. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE, 2017, pp. 1-6.
4. Kim H.M. et al. Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, Vol. 22, No. 1, pp. 227-235.
5. Kazeminasab S. et al. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems, *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2021, Vol. 1, pp. 39-46.
6. Jung C.D. et al. Optimal mechanism design of in-pipe cleaning robot, *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 1327-1332.
7. Nguyen T.T. et al. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline, *Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No. 01EX515)*. IEEE, 2001, pp. 492-497.
8. Hu Z., Appleton E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, Vol. 21, No. 5, pp. 781-789.
9. Mirshamsi M., Rafeeyan M. Dynamic Analysis of Pig through Two and Three Dimensional Gas Pipeline, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2015, Vol. 8, No. 1.
10. Kwon Y.S. et al. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 5141-5146.
11. Zhang L., Wang X. Stable motion analysis and verification of a radial adjustable pipeline robot, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2016, pp. 1023-1028.
12. Shi Y., Tang D. Adaptive control characteristics of pipeline inspection traction device, *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012.
13. Hong Z., Yang W. Development of an Adaptive Vehicle for In-Pipe Inspection Task, *ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines*, 2011, pp. 1081-1089.
14. Universal'nyy mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh sistem [Universal mechanism. Modeling the dynamics of mechanical systems]. Available at: <http://www.umlub.ru> (accessed 24 July 2021).
15. EULER – programmnyy kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh sistem [EULER – software package for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems]. Available at: <http://www.euler.ru> (accessed 24 July 2021).
16. FRUND [FRUND]. Available at: <http://frund.vstu.ru/> (accessed 10 November 2021).
17. Adams. The Multibody Dynamics Simulation Solution. Available at: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (accessed 24 July 2021).

18. Gorelov V.A., Komissarov A.I. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction, *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1322-1328.
19. Gipser M. FTire—the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 2007, Vol. 45, No. S1, pp. 139-151.
20. Besselink I.J. M. et al. The SWIFT tyre model: overview and applications, 2004, pp. 525-530.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Н.Н. Болотник.

Комиссаров Александр Игоревич – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; тел.: 89037403586; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Быков Константин Евгеньевич – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Холоденко Вячеслав Борисович – e-mail: komissarov@bmstu.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; аспирант.

Корниенко Олег Александрович – Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; директор.

Komissarov Aleksandr Igorevich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; phone: +79037403586; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Byakov Konstantin Evgen'yevich – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kholodenko Vyacheslav Borisovich – e-mail: komissarov@bmstu.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; post-graduate student.

Kornienko Oleg Aleksandrovich – Science Engineering Centre Robotics Automatic, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; director.

УДК 519.872

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-49-60

Д.А. Мищенко, А.А. Львов, Светлов М.С., А.А. Никифоров, А.Р.Д. Алалван

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Предложена полумарковская модель телекоммуникационной сети. Рассмотрен вариант динамического управления трафиком системы массового обслуживания как частного случая телекоммуникационной сети. Основная цель управления – минимизация средних затрат в единицу времени на обслуживание входящего потока информации (пакетов). При этом учтены различная пропускная способность каналов, скорость обработки информации в канале и информационная емкость буферов. Предложен подход к организации динамического управления с учетом помехоустойчивости (информационной надежности) и помехозащищенности (защиты информации). Рассмотрена задача динамического управления телекоммуникационной сетью на примере простой одноканальной структуры типа «точка-точка», которая моделируется как линейная однонаправленная Марковская цепь. Были введены параметры тарифа обслуживания, стоимости штрафа за отказ от обслуживания. Анализ позволяет сделать следующие замечания, что распределение входного информационного потока пакетов – пуассоновское, закон распределения длины пакетов и скорости их поступления имеет экспоненциальный характер, что в совокупности характеризует Марковский процесс. Однако одновременно имеют место задержки в обслуживании по отношению к моментам времени поступления запросов на обслуживание, включая задержки, связанные с переполнением буфера. Предложенная полумарковская модель телекоммуникационной сети может быть использована и для более сложных сетевых

структур. В частности, для телекоммуникационных сетей, состоящих не только из одной одноканальной системы передачи информации (одноканальной системы массового обслуживания), а представляющих собой совокупность нескольких систем, то есть для многоканальных телекоммуникационных сетей.

Телекоммуникационная сеть; динамическое управление; системы массового обслуживания; пропускная способность; помехоустойчивость.

D.A. Mishchenko, A.A. L'vov, M.S. Svetlov, A.A. Nikiforov, A.R.J. Alalvan
SEMI-MARKOV MODEL OF TELECOMMUNICATION NETWORK
WITH DYNAMIC CONTROL

The paper proposes a semi-Markov model of telecommunication network. The variant of dynamic traffic control of queuing system as a special case of telecommunication network is considered. The main purpose of control is to minimize the average cost per unit of time to service the incoming flow of information (packets). This takes into account the different bandwidth of the channels, the processing speed of information in the channel and the information capacity of the buffers. The approach to the organization of dynamic control taking into account noise immunity (information reliability) and information security is discussed. The problem of dynamic control of a telecommunication network is considered on the example of a simple single-channel structure of the "point-to-point" type, which is modeled as a linear unidirectional Markov chain. The parameters of the service tariff, the cost of the fine for refusal of service were introduced. The analysis allows us to make the following remarks that the distribution of the input information flow of packets is Poisson, the law of distribution of the length of packets and the speed of their arrival is exponential, which together characterizes the Markov process. However, there are concurrent service delays relative to the timing of service requests, including buffer overflow delays. The proposed semi-Markov model of a telecommunications network can be used for more complex network structures. In particular, for a telecommunication network, consisting not only of one single-channel information transmission system (single-channel queuing system), but representing a set of several systems, that is, for multichannel telecommunication networks.

Telecommunications network; dynamic control; queuing system; bandwidth; noise immunity.

Введение. Современные телекоммуникационные сети (ТКС) представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы распределенных систем передачи информации с разветвленными каналами связи различного типа, осуществляющие обслуживание терминалов по управлению сетевым трафиком с целью обеспечения надежного и качественного их функционирования [1–3]. С одной стороны, ТКС можно рассматривать как распределенные системы передачи данных различного функционального назначения (управления, контроля, измерения, сигнализации), с другой стороны, их можно интерпретировать как системы массового обслуживания (СМО), обеспечивающие выполнение некоторых определенных функций по запросам (заявкам) клиентов (пользователей) как внешних, так и внутренних структур систем [4–6]. Одной из основных задач при разработке и синтезе ТКС является задача обеспечения их качественного функционирования на базе специальных алгоритмов управления. Другими словами, необходимо решение задач оптимального управления трафиком ТКС, что гарантировало бы реализацию наилучших режимов выполнения ими своих целевых функций.

Отличительной особенностью преобладающего большинства современных ТКС является необходимость качественного функционирования не только при изменениях параметров и характеристик их внутренней и внешней сфер (сред), но и в условиях неконтролируемых изменений случайного характера, что накладывает дополнительные и достаточно жесткие требования на управления трафиком и ТКС в целом. В этом смысле, речь идет о необходимости использования принципов динамического управления, то есть, в известной мере, адаптивного по отношению к изменению параметров и условий работы ТКС управления [7].

Задачи динамического управления весьма разнообразны и формулируются в зависимости от целей управления как задачи оптимизации тех или иных параметров сети. Целями управления могут быть максимизация объема, пропускной способности, скорости, достоверности передачи трафика, минимизация времени задержки на обслуживание, энергетических затрат при передаче трафика, информационных потерь и числа отказов в обслуживании и др. [8]. При этом в общем случае задача оптимального динамического управления не решена. Сдерживающим фактором в построении качественных ТКС является невозможность оптимизации одновременно всех основных параметров и характеристик сети, так как почти всегда выигрыш в управлении по каким-либо одним показателям реализуется за счет вынужденного снижения качества управления по каким-либо другим показателям. Еще одним фактором, определяющим сложность реализации оптимального динамического управления, является необходимость учета тех или иных ограничений на качество обслуживания, что характерно для большинства современных ТКС, в частности для СМО с очередями и отказами в обслуживании. В общем случае всегда процесс управления сетью, как и все другие процессы, связанные с обслуживанием запросов в сети, то есть, по сути, с функционированием сети в целом, требует осуществления некоторых затрат. Поэтому независимо от их физической природы задача оптимального управления может быть сформулирована как задача минимизации затрат [9].

1. Динамическое управление ТКС. Тарифы обслуживания. Рассмотрим задачу динамического управления ТКС на примере простой одноканальной структуры типа «точка-точка», которая моделируется как линейная однонаправленная Марковская цепь, то есть как модель СМО с очередью при конечном объеме входного буфера (буферной памяти, роутера, маршрутизатора и т.п.) или, другими словами, при конечной пропускной способности сетевого канала.

Цель динамического управления состоит в том, чтобы минимизировать средние затраты в единицу времени (условно – среднюю «мощность» затрат) теоретически при неограниченном времени функционирования сети, но при условии ограничения на качество обслуживания.

Пусть поток пакетов данных, поступающий в систему, соответствует Пуассоновскому закону распределения с коэффициентом $\lambda = 1$. При этом поступающий пакет принимается, если входной буфер не заполнен (в более общем случае – канал свободен), в противном случае прием не возможен. Будем для общности считать, что информационные пакеты во входном потоке имеют разные размеры, и пусть распределение длин пакетов соответствует экспоненциальному закону. Если при этом скорость формирования любого элемента пакета (условная номинальная элементарная скорость) одинакова для всех пакетов, то скорость передачи пакетов также будет распределена экспоненциально. Будем считать, что начало и конец пакетной очереди формируются с одинаковой скоростью, то есть при свободном канале скорость «движения» очереди постоянна ($\lambda = 1$).

В контексте постановки задачи управления при n информационных пакетах введем в рассмотрение тарифы обслуживания μ_n , которые могут быть выбраны из некоторого определенного набора (множества) $M = [0, \mu]$ доступных тарифов на услуги в ТКС. Также зададим на множестве тарифов M функцию $c(x)$ нормы затрат, связанных со скоростью обслуживания x . Тогда функция $c(\mu_n), (\mu_n \in M)$ определяет необходимые затраты для обеспечения ставки тарифа μ_n . Предполагается, что эта функция $c(x)$ нормы затрат, связанных со скоростью x обслуживания, – монотонно возрастающая, строго выпуклая и непрерывно дифференцируе-

мая функция на множестве M с начальным условием $c(x=0) = c(0) = 0$. При этом нет принципиальной необходимости определять конкретный вид функции $c(x)$. Вместе с тем часто она задается в конкретном виде, например, в виде [10]:

$$c(x) = e^{ax} - 1, x \in A,$$

где a – положительная константа, а A – набор возможных значений скорости обслуживания x . Строго говоря, именно это функция затрат удовлетворяет предположениям о стоимости управления $c(\mu_n)$.

Если считать, что пропускная способность канала определяется размером буфера N , то необходимый алгоритм управления должен характеризоваться вектором $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ со всеми компонентами, принадлежащими множеству M . Следовательно, если длина очереди равна n , то μ_n интерпретируется как необходимый тариф обслуживания, соответствующий выбранному алгоритму управления при имеющихся ограничениях на качество управления. В частности, таким ограничением может быть нижняя граница долгосрочной средней пропускной способности, которая эквивалентна заданию верхней границы вероятности переполнения буфера (вероятности полной занятости канала), что, в свою очередь, соответствует стационарной Марковской модели. Более точно, рассматривается ограниченный Марковский процесс принятия решений с непрерывным временным параметром, конечным компактным пространством и инвариантным во времени долгосрочным критерием средней стоимости. Отметим, что Марковский процесс в его классическом понимании как раз и характеризуется пуассоновским распределением входного потока пакетов и экспоненциальным (или показательным) распределением времени обслуживания и функции затрат.

Для определенности и простоты будем считать, что, когда система пуста, скорость обслуживания в системе равна нулю. Для адекватности модели принципиально необходимо, чтобы выполнялось условие $\mu_n > 0, (n = 1, \dots, N)$. Одновременно это условие упрощает алгоритмически управление с использованием вектора тарифов μ и позволяет ввести в рассмотрение стационарное распределение $\eta(\mu)$ изменения длины очереди в рамках управляющего вектора тарифов μ в виде:

$$\eta(\mu) = [\eta_0(\mu), \eta_1(\mu), \dots, \eta_N(\mu)].$$

Учитывая, что параметр $\lambda = 1$ в рассматриваемом пуассоновском распределении входного потока пакетов, распределение $\eta(\mu)$ удовлетворяет следующим уравнениям баланса [11]:

$$\eta_n(\mu) = \mu_{n+1} \eta_{n+1} \text{ для } n = 0, 1, \dots, N-1; \quad (1)$$

$$\sum_{n=0}^N \eta_n(\mu) = 1. \quad (2)$$

Используя (1) и (2), определим $\eta(\mu)$:

$$\eta(\mu) = \left[\prod_{i=n+1}^N \mu_i \right] \eta_N(\mu), n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

Параметр $\eta_N(\mu)$ в (3) определится по формуле:

$$\eta_N(\mu) = (1 + \mu_N + \mu_N \mu_{N-1} + \mu_N \mu_{N-1} \mu_{N-2} + \dots + \mu_N \dots \mu_1)^{-1}. \quad (4)$$

Как упоминалось ранее, в качестве ограничения вводится верхняя граница вероятности переполнения буфера (полностью занятого канала) $\beta (0 < \beta < 1)$. Поэтому для любого допустимого процесса управления с использованием вектора тарифов μ должно выполняться условие $\eta_N(\mu) \leq \beta$.

Таким образом, класс допустимых управлений может быть задан следующим набором M_η :

$$M_\eta = \{\mu \in R^n : \mu_n \in M \setminus \{0\} \text{ для } n = 1, \dots, N, \eta_N(\mu) \leq \beta\}. \quad (5)$$

Предполагая, что множество M_η – не пустое, долгосрочная средняя стоимостная ставка z_μ , связанная с управлением с использованием вектора тарифов μ , определится как:

$$z_\mu = \sum_{n=1}^N \eta_N(\mu) c(\mu_n). \quad (6)$$

Далее определим минимальное значение средней стоимостной ставки z^* :

$$z^* = \inf \{z_\mu : \mu \in M_\eta\} \quad (7)$$

При оптимальном управлении $z^* = z_\mu$, что соответствует условию минимизации средней долгосрочной стоимостной ставки управления z_μ . Это условие и определяет цель управления по критерию минимума средней долгосрочной стоимостной ставки управления.

Очевидно, что при полностью загруженном буфере, то есть при занятом канале системы (состояние перегруженности), новая информация (поток пакетов) не поступает в систему, что, по сути, равносильно потере информации. Поэтому логично рассматривать проблему перегруженности не с точки зрения алгоритмов управления через компоненты достижения цели в условиях ограничения, а с точки зрения затрат при достижении цели управления. Другими словами, потеря информации как итог перегрузки системы может рассматриваться и оцениваться в виде штрафов за отказ от обслуживания.

2. Параметр стоимости штрафа. В частности, можно ввести в рассмотрение некоторую фиксированную стоимостную ставку штрафа $p > 0$ за отказ от обслуживания. Как показывает анализ функционирования системы при очередях с отказами, можно не учитывать скорости возникновения отказов (скорости потери информационных пакетов). Для определенности будем считать, что выполняется условие $p > c'(0)$.

Тогда, как уже указывалось выше, для возможного набора M доступных тарифов на услуги и установленной стоимостной ставки затрат $c(x)$ проблема управления состоит в динамическом выборе тарифа на обслуживание как функции текущей длины очереди на обслуживание с целью минимизации долгосрочных средних затрат на единицу времени.

При формулировании этой проблемы допустимым остается управляющий алгоритм, характеризующийся использованием вектора тарифов $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ со всеми компонентами, принадлежащими множеству тарифов M . При этом $\mu_n > 0$ ($n = 1, \dots, N$). Таким образом, класс допустимых стратегий M_η определится в соответствии с выражением (5):

$$M_n = \{\mu \in R^n : \mu_n \in M \setminus \{0\} \text{ для } n=1, \dots, N, \eta_N(\mu) \leq \beta\}. \quad (8)$$

Учитывая формулы (3) и (4) распределения входного потока пакетов, долгосрочная средняя стоимость γ_μ , связанная с управлением с использованием вектора тарифов μ , может быть записана в виде:

$$\gamma_\mu = \sum_{n=1}^N M_n(\mu) c(\mu_n) + M_N(\mu) p. \quad (9)$$

Если по аналогии с формулой (7) ввести в рассмотрение параметр γ^* как минимальную среднюю стоимость

$$\gamma^* = \inf \{\gamma_\mu : \mu \in M_n\}, \quad (10)$$

то условием оптимальности будет равенство $\gamma^* = \gamma_\mu$, что соответствует условию минимизации долгосрочной средней стоимости γ_μ . Это условие и определяет цель управления по критерию минимума средней стоимости управления.

Анализ принимаемой к рассмотрению математической модели ТКС позволяет сделать следующие замечания. Распределение входного информационного потока пакетов – пуассоновское, а закон распределения длины пакетов и скорости их поступления имеет экспоненциальный характер, что в совокупности характеризует Марковский процесс, однако одновременно имеют место задержки в обслуживании по отношению к моментам времени поступления запросов на обслуживание, включая задержки, связанные с переполнением (перегруженностью) буфера. К тому же характер распределения процессов управления в общем случае не оговаривается и может быть любым. Это позволяет сделать вывод, что динамическое оптимальное управление в данном контексте должно рассматриваться как полумарковский процесс принятия решений со средним критерием стоимости [12–14].

Для такой модели можно ввести в рассмотрение функцию v относительной стоимости средних затрат на динамическое управление в виде вектора $v_n = (v_0, v_1, \dots, v_N)$ с целью обобщения понятия параметра γ :

$$v_1 = v_0 + \gamma; \quad (11)$$

$$v_n = \min_{x \in A} \{c(x) - \gamma + v_{n+1} + xv_{n-1} + (\bar{\mu} - x)v_n\} / (1 + \bar{\mu}), \quad n = 1, \dots, N-1; \quad (12)$$

$$v_n = \min_{x \in A} \{c(x) + p - \gamma + xv_{N-1} + (\bar{\mu} - x)v_n\} / \bar{\mu}. \quad (13)$$

Уравнения (11)–(13) определяют относительные затраты с точностью только до аддитивной константы, даже если параметр γ рассматривается как константа, известная по величине. Поэтому логично определить относительную величину стоимостного различия y_n :

$$y_n = v_n + v_{n-1} \text{ для } n = 1, \dots, N. \quad (14)$$

Тогда можно переформулировать (11) и (12) следующим образом:

$$y_{n+1} = \max_{x \in A} \{xy_n - c(x)\} + \gamma, \quad n = 1, \dots, N-1, \quad (15)$$

$$p = \max_{x \in A} \{xy_N - c(x)\} + \gamma. \quad (16)$$

Если ввести в рассмотрение функцию $\varphi(y)$ как функцию, зависящую от относительной величины стоимостного различия и определяющую ее, в виде:

$$\varphi(y) = \sup_{x \in A} \{yx - c(x)\}, y > 0, \quad (17)$$

тогда выражения (11), (15) и (16) могут быть эквивалентно представлены следующим образом:

$$y_1 = \gamma, \quad (18)$$

$$y_{n+1} = \gamma + \varphi(y_n), n = 1, \dots, N-1, \quad (19)$$

$$p = \gamma + \varphi(y_N). \quad (20)$$

Приведенные уравнения (18)–(20) можно интерпретировать как уравнения оптимальности.

С учетом допущений о норме затрат $c(x)$ и наборе M доступных тарифов на услуги можно сделать вывод о том, что функция (17) конечна для всех $y \geq 0$, и существует некоторая функция $\psi(y_n)$, максимизирующая каждый из параметров $y \geq 0$.

Если считать, что γ и (y_1, \dots, y_N) – это решения уравнений оптимальности (18)–(20), тогда, если $y_n \geq 0$ ($n = 1, \dots, N$), то справедливы алгоритмы управления, соответствующие условию $\mu_n = \psi(y_n)$. В свою очередь, это означает, что при $\mu_n > 0$ ($n = 1, \dots, N$) условием оптимальности будет равенство $\gamma_\mu = \gamma = \gamma^*$, что, как уже указывалось ранее, полностью соответствует условию управления при минимизации средних затрат на управление.

Вместе с тем необходимо выразить параметрическую зависимость решения уравнений оптимальности от ставки штрафа p .

Функция $\psi(y)$, максимизирующая значения параметров y , может быть записана в виде:

$$\psi(y) = \operatorname{argmax} \{yx - c(x)\}, y \geq 0, x \in A. \quad (21)$$

Анализируя поведение функции $\psi(y)$ при различных значениях параметра y , можно детализировать значения функции $\psi(y)$ следующим образом:

$$\psi(y) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq y \leq c'(0); \\ (c')^{-1}(y), & \text{если } c'(0) < y < c'(\bar{\mu}); \\ \bar{\mu}, & \text{если } y \geq c'(\bar{\mu}). \end{cases} \quad (22)$$

Зависимость между функцией $\varphi(y)$, определяющей относительную величину стоимостного различия затрат на управление, и функцией $\psi(y)$, максимизирующей значения относительных разностных величин y , определяется формулой (15):

$$\varphi(y) = \int_0^y \psi(u) du, y \geq 0, \quad (23)$$

где $\psi(y)$ соответствует формуле (21) (или (22)) при значениях обобщенного параметра u , последовательно и поочередно равного компонентам вектора (y_1, \dots, y_N) .

Анализ свойств функций φ и ψ – формулы (22) и (23) – с учетом их физического смысла и связи с параметрами алгоритма управления дает возможность сделать вывод, что при решении уравнений оптимальности для каждого параметра $\gamma > c'(0)$ определится соответствующее значение $y_n(\gamma)$ для $n = 1, \dots, N$ следующим образом:

$$y_1(\gamma) \equiv \gamma \text{ и } y_{n+1}(\gamma); \gamma + \varphi(y_{n+1}(\gamma)), n = 1, \dots, N-1. \quad (24)$$

Следовательно, справедливо выражение:

$$f(\gamma) \equiv \gamma + \varphi(y_n(\gamma)), \gamma > c'(0), \quad (25)$$

где $f(\gamma)$ – функция связи со ставкой штрафа.

Другими словами, для каждого значения параметра штрафа $p > c'(0)$ можно однозначно выбрать значение параметра $\gamma > c'(0)$ так, чтобы выполнялось условие:

$$\gamma(p) \equiv p. \quad (26)$$

В заключение рассмотрим минимизацию средних затрат с учетом введенного ограничения по перегрузке буфера [16].

3. Минимизация средних затрат с учетом ограничения перегрузки буфера. Пусть $\beta(p)$ – долгосрочная средняя скорость отказов в поступлении пакетов при оптимальном алгоритме с использованием вектора тарифов μ , которая может быть определена через распределение $\eta_N(\mu(p))$. Найдем ее параметрическую зависимость от штрафной ставки p .

Используя зависимости (3) и (4), можно получить выражение для долгосрочной средней скорости отказов в обслуживании как функции от величины штрафа в виде:

$$\beta(p) = [1 + \mu_N(p) + \mu_N(p)\mu_{N-1}(p) + \dots + \mu_N(p)\dots\mu_1(p)]^{-1}, \quad (27)$$

где $\mu_n(p) = \psi[y_n(\gamma(p))]$ ($n = 1, \dots, N$).

Из выражения (27) следует, что для всех $n = 1, \dots, N$ справедливо равенство $\mu_n(p) = \bar{\mu}$. Тогда анализ выражений (22) и (27) позволяет утверждать, что существует такое значение величины штрафа p^* , при котором $\beta(p^*) = \beta$.

Имея в виду формулы (6) и (7), можно получить:

$$z_{\mu(p)} = z^* = \gamma^* - p^*\beta. \quad (28)$$

Таким образом, формула (28) позволяет определить величину штрафа в зависимости от долгосрочных средних стоимостных затрат на реализацию алгоритма управления с использованием вектора тарифов μ из множества M возможных тарифов.

4. Анализ результатов. В случае многоканальных ТКС необходимо учитывать разную пропускную способность каналов, различия в скорости обработки информации в каждом канале и в информационной емкости буферов. Одновременно следует учитывать, что полная потеря информации в таких многоканальных структурах возможна лишь в условиях полной занятости одновременно всех каналов. Это накладывает условия на определение величины штрафа при разных длительностях очередей в различных каналах. Также надо иметь в виду, что в многоканальных ТКС целесообразно режим очередей с отказами заменить на режим с ожиданием и условными отказами, что позволит применять более эффективные алгоритмы управления трафиком, что, в конечном счете, повысит качество обслуживания [17].

Отдельно следует сказать, что одним из определяющих показателей эффективности и качества ТКС является информационная надежность, то есть помехоустойчивость информационных каналов, позволяющая обеспечить требуемые характеристики по достоверности приема информации, передаваемой по каждому

каналу. При этом, имея в виду распределенный характер структур ТКС, причем, как правило, с каналами, распределенными по большой территории, необходимо учитывать не только возможное различие типов физических каналов, но и разную статистику канальных помех [18–20]. Очевидно, можно обеспечить необходимый уровень достоверности приема, ориентируясь на наихудшие с точки зрения помеховой обстановки канальные условия. Например, можно считать, что все каналы работают в условиях действия помех большой интенсивности, когда $f_{\text{с.п.}} / f_{\text{к}} \geq 3$ ($f_{\text{с.п.}}$ и $f_{\text{к}}$ – частоты следования импульсов в потоке случайных импульсных помех и следования информационных кодовых посылок в канале, соответственно). Однако такой вариант оказывается самым не экономичным, так как требует сложных многокаскадных кодовых форматов и, следовательно, далеко не просто реализуемых аппаратно-программных средств кодирования и декодирования. Поэтому целесообразным является вариант использования адаптивных режимов функционирования сетевых каналов, учитывающих специфику статистики помех каналов.

Еще одним условием обеспечения высокого качества функционирования ТКС является необходимость обеспечения требуемого уровня помехозащищенности, что подразумевает учет требований по информационной безопасности, включая вопросы несанкционированного доступа и парирования действия специально организованных помех.

В свете сказанного, для синтеза эффективных алгоритмов оптимального динамического управления необходима разработка обобщенного критерия эффективности, который должен быть многопараметрическим и учитывающим основные показатели, характеризующие качество функционирования ТКС.

Такой комплексный критерий эффективности одновременно мог бы служить оценкой используемых моделей ТКС, что повысило бы качество и эффективность моделирования ТКС различных структур, типов и функциональных особенностей.

Заключение. В работе предложен вариант динамического управления ТКС на основе полумарковской модели СМО как частного случая ТКС. Работа характеризует круг актуальных перспективных проблем исследования и синтеза качественных ТКС и алгоритмов оптимального динамического управления, инвариантных к контролируемым и неконтролируемым изменениям условий функционирования ТКС.

Предложенная полумарковская модель ТКС может быть использована и для более сложных сетевых структур. В частности, для ТКС, состоящих не только из одной одноканальной системы передачи информации (одноканальной СМО), а представляющих собой совокупность нескольких систем, т.е. для многоканальных ТКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
2. *Нейман В.И.* Системы и сети передачи данных на ж.-д. транспорте. – М.: Маршрут, 2005. – 470 с.
3. *Алиев Т.И.* Сети ЭВМ и телекоммуникации: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 400 с.
4. *Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В.* Системы и сети передачи информации: учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
5. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. *Саати Т.Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.
7. *Лившиц Б.С.* Особенности характеристик качества обслуживания примитивного потока вызовов // В кн.: Теория телетрафика и информационные сети. – М.: Наука, 1977. – С. 67-80.

8. Долгов В.И., Митрофанов Ю.И., Рогачко Е.С. Метод анализа сетей массового обслуживания с динамическим управлением интенсивностями обслуживания // Известия Саратовского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика». – 2009. – Т. 9. – Вып. 3. – С. 22-27.
9. Элдин А., Линд Г. Основы теории телетрафика. – М.: Связь, 1972. – 199 с.
10. Духовный И.М., Шимко М.Ф. Оценка эффективности контроля состояний пучков каналов на сети с динамическим управлением // В кн.: Теория телетрафика и информационные сети. – М.: Наука, 1977. – С. 91-98.
11. Karlin S., Taylor H.M. A First Course in Stochastic Processes. – 2nd ed. – Academic Press, San Diego, CA, 1997. – 573 p.
12. Кемени Дж.Дж., Снелл Дж.Л. Конечные цепи Маркова. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
13. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 236 с.
14. Карманов А.В. Исследование управляемых конечных марковских цепей с неполной информацией (минимаксный подход). – М.: Физматлит, 2002. – 176 с.
15. George J.M., Harrison J.M. Dynamic control of a queue with adjustable service rate // Oper. Res. – 2001. – Issue 49. – No. 5. – P. 720-731.
16. Rockafellar R.T. Convex Analysis. – Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997. – 472 p.
17. Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Vagarina N.S. Mathematical Model of Information and Communication Networks // Proc. of the XIII Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542330.
18. Mishchenko D.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Svetlov I.M., Vagarina N.S., Svetlova M.K. Mathematical model of the control system for network with recovery // Тр. Междунар. симп. «Надежность и качество»: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 242-245.
19. Алалван А.Р.Д., Львов П.А., Светлов М.С., Львов А.А., Мищенко Д.А., Никуфоров А.А. Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. X Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 273-280.
20. Мищенко Д.А. Методы моделирования надежности для сетей связи // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сб. научных статей. – Саратов: Изд. центр «Наука», 2021. – С. 399-401.

REFERENCES

1. Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: uchebnik dlya vuzov [Computer networks. Principles, technologies, protocols: textbook for universities]. Saint Petersburg: Piter, 2010, 944 p.
2. Neyman V.I. Sistemy i seti peredachi dannyh na zh.-d. transporte [Systems and data transmission networks on railway transport]. Moscow: Marshrut, 2005, 470 p.
3. Aliev T.I. Seti EVM i telekommunikatsii: ucheb. posobie [Computer networks and telecommunications: a textbook]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2011, 400 p.
4. Garanin M.V., Zhuravlev V.I., Kunegin S.V. Sistemy i seti peredachi informatsii: ucheb. posobie [Information transmission systems and networks: textbook]. Moscow: Radio i svyaz', 2001, 336 p.
5. Kleynrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 432 p.
6. Saati T.L. Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya [Elements of the theory of queuing and its applications]. Moscow: Sov. radio, 1971, 520 p.
7. Livshits B.S. Osobennosti harakteristik kachestva obsluzhivaniya primitivnogo potoka vyzovov. V kn.: Teoriya teletrafika i informatsionnye seti [Features of the service quality characteristics of a primitive call flow. In the book: Theory of teletraphy and information networks]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 67-80.
8. Dolgov V.I., Mitrofanov Yu.I., Rogachko E.S. Metod analiza setey massovogo obsluzhivaniya s dinamicheskim upravleniem intensivnostyami obsluzhivaniya [A method for analyzing queuing networks with dynamic management of service intensities], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya "Matematika. Mekhanika. Informatika"* [News of Saratov University. The series "Mathematics. Mechanics. Informatics"], 2009, Vol. 9, Issue 3, pp. 22-27.

9. *Elldin A., Lind G.* Osnovy teorii telegrafika [Fundamentals of the theory of telegraphy]. Moscow: Svyaz', 1972, 199 p.
10. *Duhovnyy I.M., Shimko M.F.* Otsenka effektivnosti kontrolya sostoyaniy puchkov kanalov na seti s dinamicheskim upravleniem [Evaluation of the effectiveness of monitoring the states of channel bundles on a network with dynamic control], *V kn.: Teoriya telegrafika i informatsionnye seti* [In the book: The theory of telegraphy and information networks]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 91-98.
11. *Karlin S., Taylor H.M.* A First Course in Stochastic Processes. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA, 1997, 573 p.
12. *Kemeni Dzh.Dzh., Snell Dzh.L.* Konechnye tsepi Markova [Finite Markov chains]. Moscow: Nauka, 1970, 272 p.
13. *Korolyuk V.S., Turbin A.F.* Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem [Markov recovery processes in system reliability problems]. Kiev: Nauk. dumka, 1982, 236 p.
14. *Karmanov A.V.* Issledovanie upravlyaemykh konechnykh markovskikh tsepey s nepolnoy informatsiey (minimaksnyy podhod) [Investigation of controlled finite Markov chains with incomplete information (minimax approach)]. Moscow: Fizmatlit, 2002. 176 p.
15. *George J.M., Harrison J.M.* Dynamic control of a queue with adjustable service rate, *Oper. Res.*, 2001, Issue 49, No. 5, pp. 720-731.
16. *Rockafellar R.T.* Convex Analysis. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997, 472 p.
17. *Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Vagarina N.S.* Mathematical Model of Information and Communication Networks, *Proc. of the XIII Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542330.
18. *Mishchenko D.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Svetlov I.M., Vagarina N.S., Svetlova M.K.* Mathematical model of the control system for network with recovery, *Tr. Mezhdunar. simp. «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2018, pp. 242-245.
19. *Alalvan A.R.D., L'vov P.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Nikiforov A.A.* Problemy obespecheniya nadezhnosti besprovodnykh setey datchikov [Problems of ensuring the reliability of wireless sensor networks], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. X Vseros. nauch. konf. [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference]*. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 273-280.
20. *Mishchenko D.A.* Metody modelirovaniya nadezhnosti dlya setey svyazi [Methods of reliability modeling for communication networks], *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh: Sb. nauchnykh statey [Management problems in socio-economic and technical systems: A collection of scientific articles]*. Saratov: Izd. tsentr «Nauka», 2021, pp. 399-401.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Землянухин.

Мищенко Дмитрий Алексеевич – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; г. Саратов, Россия; тел. +79093353999; аспирант.

Львов Алексей Арленович – e-mail: alvova@mail.ru; тел.: +79172015675; кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций; д.т.н.; профессор.

Никифоров Александр Анатольевич – e-mail: ieei_director@mail.ru; тел.: +79172182375; к.т.н.; директор Института электронной техники и приборостроения.

Алалван Амин Раад Джихад – e-mail: ameenraad2@gmail.com; тел. +79915003091; аспирант.

Светлов Михаил Семенович – Институт проблем точной механики и управления РАН; e-mail: svetlovms@yandex.ru; г. Саратов, Россия; тел.: +79878263745; лаборатория системных проблем управления и автоматизации в машиностроении; д.т.н.; в.н.с.

Mishchenko Dmitriy Alekseevich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; Saratov, Russia; phone: +79093353999; postgraduate student.

L'vov Alexey Arlenovich – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; the department of radioelectronics and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

Nikiforov Alexander Anatolievich – e-mail: ieei_director@mail.ru; phone: +79172182375; cand. of eng. sc.; Director of the Institute of Electronic Engineering and Instrumentation.

Alalvan Amin Raad Jihad – e-mail: ameenraad2@gmail.com.ru; phone: +79915003091; post-graduate student.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79878263745; Laboratory of system problems of control and automation in mechanical engineering; dr. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 004.7

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-60-68

И.В. Родыгина, В.А. Новак**МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ MESH-СЕТЬ НА ОСНОВЕ СПЕЦИФИКАЦИИ ZigBee**

В настоящее время наиболее распространенной технологией беспроводного доступа, которая повсеместно применяется для передачи большого количества трафика различного вида, является стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11. Одним из самых перспективных направлений развития технологии стали MESH-сети. MESH-сети предоставляют наиболее интересные решения, интегрирующие различные технологии беспроводного доступа. Возможность организации с помощью MESH-топологии локальных (LAN) и городских (MAN) сетей, легко интегрируемых в глобальные сети (WAN), является положительным фактором для применения на судне. В морской практике все чаще используют системы, основанные на оцифровке и автоматизации, объединенные в сети. В данной статье рассматривается моделирование взаимодействия устройств в MESH-сети на основе спецификации ZigBee, принцип работы канального уровня, который используется в этой сети, а также вариант метода предотвращения повышенного потребления энергии, используемой сети. Одним из преимуществ сети ZigBee является способность отслеживания участников сети и самой топологии в режиме их частых подключений, отключений и переключений. В этом случае необходимо произвести анализ скорости сети, надежности, пропускной способности. Для данной цели проведены оценка среднего времени ожидания на подключение узла, вероятность успешного подключения узла к сети, вероятность нахождения канала занятым при первом и втором зондировании несущей и тест пропускной способности рассматриваемой сети. Полученные результаты анализа свидетельствуют о работоспособности сети в различных ситуациях: как при обычных условиях, так и в сложной помеховой обстановке.

Беспроводная сеть; ZigBee; MESH-сеть; CSMA/CA.

I.V. Rodygina, V.A. Novak**SIMULATION OF WIRELESS MESH NETWORK BASED ON ZigBee SPECIFICATION**

Currently, the most widespread wireless access technology, which is widely used to transmit a large amount of traffic of various types, is the IEEE 802.11 wireless LAN standard. MESH networks have become one of the most promising areas of technology development. MESH networks provide the most interesting solutions integrating various wireless access technologies. The possibility of organizing local (LAN) and metropolitan (MAN) networks using MESH topology, easily integrating into wide area networks (WAN), is a positive factor for use on a ship. In maritime practice, networks based on digitalization and automation are increasingly used. This article discusses modeling the interaction of devices in a MESH network based on the ZigBee specification, the principle of operation of the data link layer, which is used in this network, as well as a variant

of the method for preventing increased consumption of energy used by the network. One of the advantages of the ZigBee network is the ability to track network participants and the topology itself in the mode of their frequent connections, disconnections and reconnections. In this case, it is necessary to analyze the network speed, reliability, bandwidth. For this purpose, we estimated the average waiting time for connecting a node, the probability of a successful connection of a node to the network, the probability of finding a channel busy during the first and second probing of the carrier, and a test of the throughput of the network under consideration. The obtained results of the analysis indicate the operability of the network in various situations: both under normal conditions and in a difficult jamming environment.

WIRELESS network; ZigBee; MESH-network; CSMA/CA.

Введение. MESH-сеть основана на контроллерах, которые осуществляют взаимодействие друг с другом и отличаются от обычных иерархических сетей или сетей типа звезда, где все взаимосвязи фиксированы. Это дает возможность обеспечить гибкость сети при добавлении новых контроллеров и устройств или при изменении конфигурации сетей, которые уже существуют [1]. MESH-сети могут интегрировать в себе различные сетевые и радиотехнологии. Особая актуальность MESH-сетей определяется развитием микроэлектроники, появлением множества различных устройств, способных работать автономно долгое время, имеющих особенность многократной смены режима и нуждающихся в обмене информацией со своим окружением, а возможно и с управляющим или информационным центром.

Протокол ZigBee – это международный открытый стандарт, контролируемый объединением ZigBee Alliance, который был создан на основе стандарта IEEE802.15.4 для пакетной беспроводной передачи данных. Он обеспечивает гибкие, расширяемые сетевые топологии, содержит встроенные функции для организации сетей и маршрутизации передаваемых данных. Он обеспечивает также простую установку и высокую устойчивость к сбоям, полноценные меры по безопасности, преодолевает традиционные ограничения маломощных беспроводных сетевых решений, такие как малая дальность и ограниченное покрытие, а также уязвимость к сбоям в узле и в радиолинии. Спецификация ZigBee является одной из наиболее популярных спецификаций, построенных по принципу ячеистой топологии MESH. Она реализует асинхронную низкоскоростную сеть передачи данных. ZigBee поддерживаются разнообразные конфигурации сети и устройства объединены по следующим топологиям: «точка – точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многоячейковая MESH-сеть».

Обычно в MESH-сети узел ретранслирует или передает данные пока не достигается узел назначения. Такая сеть является мощной для маршрутизации данных и за счет этого при взаимодействии узлов между собой достигается равное распределение данных.

Преимуществом является надежность сети за счет избыточности маршрутов между устройствами. То есть в случае, если некоторые узлы отключатся, выйдут из строя или будут находиться в сложной помеховой обстановке, то работа сети не нарушится [2]. Еще одно из преимуществ MESH-сетей – независимость. Можно создать свою мобильную сеть передачи данных, которую никто не контролирует, и всё время оставаться на связи. Чем больше абонентов, тем плотнее и надёжнее сеть. Таким образом, можно всегда оставаться на связи в местах, где отсутствует сетевая инфраструктура. Главным недостатком сети является то, что спецификация подразумевает наличие каналов в диапазоне частот 2,4 ГГц, который также могут занимать устройства, работающие согласно стандарту IEEE802.11 (Wi-Fi), поэтому, учитывая, что ZigBee использует одноканальное решение, могут наблюдаться трудности в эффективной борьбе с помехами. Но надо учитывать, что пропускная способность ZigBee, по сравнению с тем же Wi-Fi, является достаточно низкой и максимально может достигать порядка 250 кбит/с.

Стандарт IEEE 802.15.4 реализует простой метод, позволяющий нескольким устройствам использовать один и то же частотный канал для передачи данных. Механизм доступа к каналу называется CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). CSMA/CA – класс протоколов доступа к среде передачи данных в беспроводных сетях (метод множественного доступа с обнаружением несущей и избеганием коллизий).

Принцип работы протокола канального уровня. Спецификация IEEE 802.15.4 описывает два режима работы сети: маячковый и без маяков. В режиме без маяков маршрутизаторы постоянно прослушивают эфир, потому нельзя построить сеть со сверхнизким энергопотреблением. В маячковом режиме все устройства с определённым периодом посылают в эфир специальные кадры, называемые маяками. Интервал между маяками (BI) включает в себя активный период, называемый суперфреймом, и неактивный период (рис. 1). В течение суперфрейма возможна передача кадров данных. Во время неактивного периода узлы засыпают.

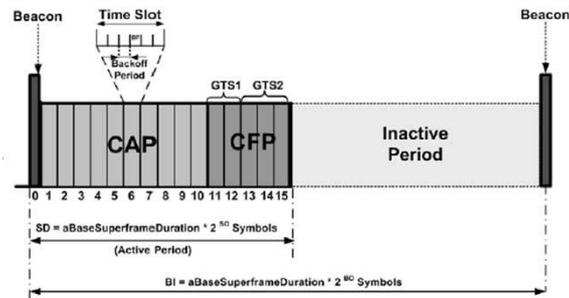


Рис. 1. Принцип работы сети в маячковом режиме

Интервал между маяками и длительность суперфрейма определяются параметрами Beacon Order (BO) и Superframe Order (SO) соответственно:

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}, 0 \leq BO \leq 14. \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}, 0 \leq SO \leq BO, \quad (2)$$

где $aBaseSuperframeDuration$ обозначает минимальную длительность суперфрейма, соответствующую $SO = 0$. Эта величина фиксирована и равна 15.36 мс [IEEE Std. 802.15.4, 2003], 250 кбит/с в частотном диапазоне 2.4 ГГц.

Так же появляется вопрос о снижении энергопотребления. Ввиду этого отказ от идеи самоорганизации и централизация управления сетью приводит к отсутствию необходимости в собственном суперфрейме на конечных устройствах. Это снижает энергопотребление конечных устройств почти вдвое. Дальнейшая оптимизация связана с возможностью конечного устройства засыпать сразу же после родительского маяка, не слушая суперфрейм, при условии, что устройству не адресовано данных и у него нет данных для отправки. Эта оптимизация позволяет снизить энергопотребление ещё в 3–4 раза. Результаты теоретического расчёта приведены на рис. 2.

Из рисунка видно, что чем более быстрой является сеть, тем более эффективны оптимизации. Но при $BO - SO \leq 1$ из формул (1) и (2) следует, что $BI/SD \leq 2$, и становится невозможно построить сеть с маршрутизаторами из-за проблемы скрытой станции. Поэтому имеет смысл рассматривать только сети с $BO - SO = |SO=0| = BO \geq 2$. В такой ситуации батареи маршрутизаторов будут разряжаться в 6–7 раз быст-

рее, чем батареи конечных устройств и время жизни всей сети будет определяться временем жизни маршрутизаторов. Чтобы этого избежать, предлагается следующий подход.

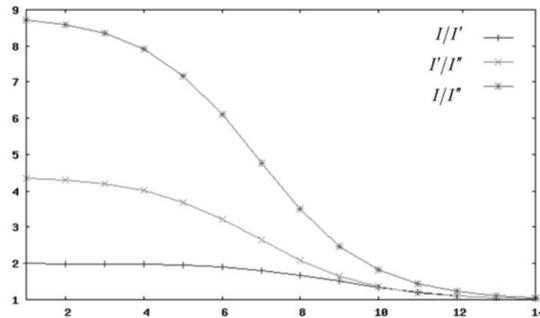


Рис. 2. Зависимость отношений средних сил токов от ВО (I' – сила тока с учётом первой оптимизации, I'' – с учётом обеих, I – без учёта оптимизаций)

Рассмотрим сеть, состоящую из N узлов. Обозначим через $V = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ множество узлов. Два узла, находящиеся в области прямой видимости друг друга, образуют ребро. Таким образом, мы получим граф смежности $G = \{V, E\}$. Для простоты считаем граф связанным и неориентированным. Узел a_0 – координатор сети. Построим все связанные подграфы T_k , $k \in 1, K$ графа G , являющийся деревом с корневым элементом a_0 и содержащий все вершины G . R_k – набор всех маршрутизаторов графа T_k . Если динамически менять роли узлов и перестраивать топологию сети, то можно приблизить время жизни сети ко времени жизни конечных устройств. Это увеличение времени жизни возможно за счёт того, что большую часть времени каждый из узлов будет находиться в роли конечного устройства. При этом наборы одновременно работающих маршрутизаторов циклически сменяют друг друга. Решения о перестроении топологии принимаются на координаторе сети.

Особенно важно для беспроводных сетей, где обнаружение столкновения альтернативного CSMA/CD является ненадежным из-за проблемы с скрытым узлом. CSMA/CA – это протокол, который работает на уровне канала передачи данных модели OSI. Перед передачей данных в «эфир», станция отправляет специальный фрейм, RTS (Ready To Send), который извещает остальных о том, что узел готов передать данные, а также предполагаемую продолжительность и узел назначения. Узел назначения отвечает фреймом CTS (Clear To Send), сообщая о готовности к приёму.

В данном методе, в любое время, когда устройству необходимо осуществить передачу, оно сначала выполняет оценку канала на занятость (Clear Channel Assessment, CCA), чтобы убедиться, что канал не используется кем-либо другим, а только после этого начинает передачу своего собственного сигнала. Когда устройство планирует передать сигнал, оно сначала переходит в режим приема для обнаружения и оценки уровня энергии сигнала (EnergyDetection, ED) в желаемом канале. При проведении процедуры ED приемник не пытается декодировать сам сигнал, а лишь проводит оценку уровня его энергии. Если сигнал уже есть в интересующей полосе, то ED не определяет, является ли это сигналом стандарта IEEE 802.15.4 [3].

Альтернативным способом определения доступности канала является оценка несущей (Carrier Sense, CS). В CS, в отличие от ED, производится декодирование сигнала и сравнение преамбулы на принадлежность стандарту IEEE 802.15.4.

В случае соответствия устройство считает канал занятым, даже если энергия сигнала ниже определенного порога, и отключается на произвольный период времени, а затем повторяет попытку (заданное количество раз). Попытки повторяются до тех пор, пока канал не станет свободным или не будет достигнуто их максимально возможное число.

Изменения структуры в рассматриваемой системе могут происходить по различным причинам. Например, подключение новых узлов, которые могут отключаться или повторно присоединяться, но уже в другом месте (при осуществлении перезагрузки устройства).

Одним из преимуществ сети ZigBee является способность отслеживания участников сети и самой топологии в режиме их частых подключений, отключений и переподключений. В таком случае необходимо произвести анализ скорости сети, надежности, пропускной способности. Для данной цели использована среда разработки MATLAB (версия 2020).

Рассмотрим основные исходные параметры анализируемой сети:

- ◆ количество узлов – 10;
- ◆ скорость передачи данных – 19,2 кбит/с;
- ◆ размер данных в кадре MAC – 800 бит;
- ◆ мощность передатчика – 5 дБм;
- ◆ отношение E_b/N_0 – 15 дБ;
- ◆ полоса пропускания – 30 кГц;
- ◆ максимальное число попыток обработки подключения к каналу алгоритмом CSMA-CA перед объявлением сбой доступа (`macMaxCSMABackoffs`) -4;
- ◆ максимальное количество попыток повторного подключения к каналу, разрешенных после неудачной попытки подключения (`macMaxFrameRetries`) -3.

В первую очередь проведена оценка среднего времени ожидания на подключение узла.

Соответствующий график продемонстрирован на рис. 3.

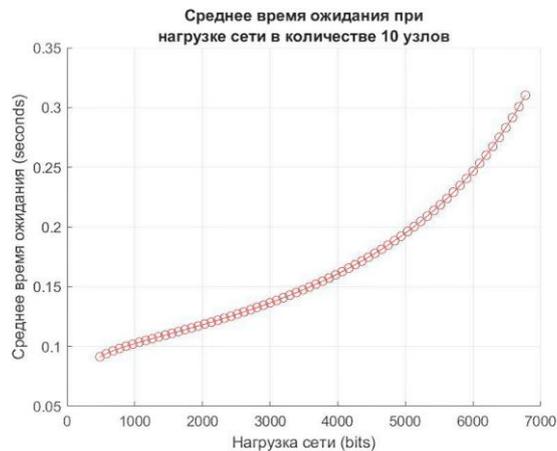


Рис. 3. Зависимость среднего времени ожидания от нагрузки в канале

Исходя из полученной зависимости можно наблюдать, что время ожидания на подключение узла растет в зависимости от нагрузки. Стоит заметить, что даже при большой загруженности сети не возникает длительных ожиданий и устройства могут достаточно быстро инициировать подключение к сети или передачу данных.

Далее следует рассмотреть надежность сети при различных нагрузках. Для оценки надежности используется величина, отображающую вероятность успешного подключения узла к сети. Полученный график проиллюстрирован на рис. 4.

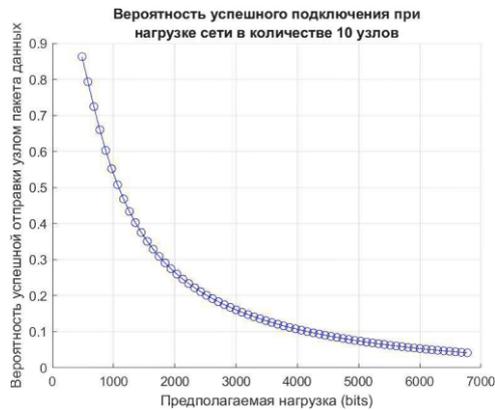


Рис. 4. Вероятность успешного подключения к сети

В данной ситуации можем наблюдать, что вероятность успешного подключения узла имеет экспоненциальный характер, что соответствует нормальному закону распределения случайной величины, и уменьшается при нагрузке сети.

Затем проведем анализ занятости каналов. Для оценки будем использовать вероятность нахождения канала занятым во время первого зондирования несущей (Alpha) и во время второго зондирования несущей (Beta). Данные зависимости отображены на рис. 5.

Расчеты вероятностей Alpha и Beta выполнены на основе цепей Маркова [5]. Модель принимает сценарий N станций, пытающихся связаться с приемником. Вероятность того, что узел попытается первым зондированием несущей передать кадр, вероятность того, что узел найдет канал занятым во время первого зондирования и вероятность того, что узел найдет канал занятым во время второго зондирования, обозначаются переменными τ , α и β . Эти три вероятности связаны системой из трех нелинейных уравнений, которая возникает из нахождения стационарных вероятностей варианта цепи Маркова.

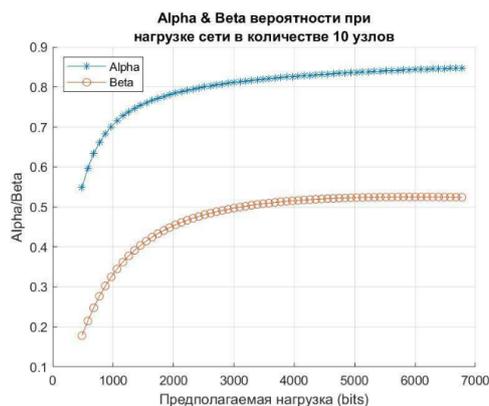


Рис. 5. Вероятность нахождения канала занятым при первом и втором зондировании несущей

Далее проведен тест пропускной способности рассматриваемой сети.

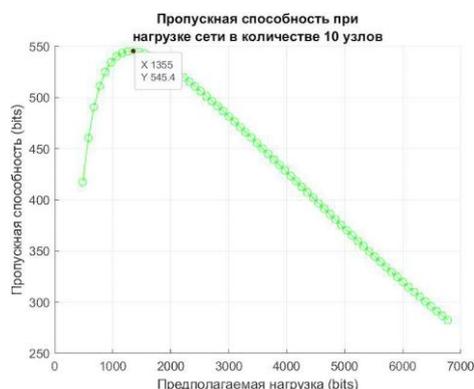


Рис. 6. Зависимость пропускной способности от нагрузки сети

Анализируя данный график, можно заметить, что пропускная способность начинает снижаться уже при нагрузке сети в 1355 бит. Конечно, данная оптимальная величина пропускной способности получена в конкретной моделируемой ситуации, рассматриваемой в данной статье, и может меняться в ту или иную сторону. Это обусловливается асинхронностью сети ячеистой топологии, так как узлы инициируют передачу данных независимо друг от друга, а соответственно эти моменты могут совпасть. Также стоит учитывать, что на пропускную способность оказывает влияние и помеховая обстановка – в частотной полосе диапазона 2,4 ГГц могут передаваться сигналы других сетей, например, Wi-Fi.

Заключение. В ходе проделанной работы было проведено моделирование работы данного метода взаимодействия устройств в сети на основе спецификации ZigBee. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности сети в различных ситуациях: как при обычных условиях, так и в сложной помеховой обстановке. Причем, даже при нагрузке сети десятью источниками передачи данных, она сохраняет работоспособность, но с большим ожиданием подключения и меньшей полосой пропускания, что является несомненным достоинством.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вихляева В.В.* Динамическая децентрализованная энергонезависимая беспроводная сеть использованием Mesh-сети на судне // Вестник магистратуры / под общ. ред. Е.А. Мурзина. – 2019. – № 4-1 (91). – С. 26-27.
2. *Лисничук А.А.* Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 4. – Вып. 66. – Ч. 1. – С. 9-15.
3. IEEE Std 802.15.4-2015, September, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2007.
4. *Ильиныха Н., Борисов А.П.* Ячеистая топология сети Zigbee // Современные технологии в мировом научном пространстве: Сб. статей. – Уфа, 2017. – С. 78-80.
5. *Park P., Di Marco P., Soldati P., Fischione C., Johansson K.H.* A Generalized Markov Chain Model for Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4 // Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE 6th International Conference, Macau, 2013. – P. 130-139.
6. *Попков Г.В.* Mesh-сети: перспективы развития, возможные применения // Вычислительные и сетевые ресурсы. – Новосибирск, 2012. – С. 74-79.
7. *Вишневецкий В.В., Портной С.Л., Шахнович И.В.* Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G. – Техносфера, 2010.

8. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Санкт-Петербург, 2016. – 992 с.
9. *Плужников А.А.* Маршрутизация в беспроводных Ad-hoc сетях, основанная на топологических свойствах сети // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2015. – С. 164-169.
10. *Hongwei Li, Zhongning Jia; Xiaofeng Xue.* Application and Analysis of ZigBee Security Services Specification // Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, China, 2010.
11. *Muthu Ramya C., Shanmugaraj M., Prabakaran R.* Study on ZigBee technology // 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, India, 2011.
12. *Шаблюй Г.Ф., Анишко О.Б.* Обеспечение экологической безопасности от потенциально опасных судов с использованием системы мониторинга судоходства // Системы управления и обработки информации. – 2015. – С. 92-94.
13. *Мудров А.А., Кемайкин В.К.* Методика обработки отраженного радиолокационного сигнала в интересах распознавания цели типа квадрокоптер // Всероссийская научно-практическая конференция ТвГТУ, 2019. – С. 78-80.
14. Безопасность сетей 802.11 – основные угрозы. Хабр. 2012. – URL: <https://habr.com/ru/post/151126/> (дата обращения: 05.03.2021).
15. Стандарт IEEE 802.15.4z. Хабр. 2019. – URL: <https://habr.com/ru/post/457876/> (дата обращения: 6.03.2021).
16. *Яхив И.Д.* Клиент-серверная система на основе беспроводной сети стандарта IEEE 802.15.4 // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – 2014. – С. 1-21.
17. Протоколы бывают разные... ВАСnet. 2017. – URL: http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT_ID=746 (дата обращения: 19.02.2021).
18. *Жуков М.О., Иванов А.Е., Меркулов И.В., Нарымский Б.В.* Использование сетей стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee в системах шахтной автоматизации // Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами. – 2012. – С. 42-46.
19. *Зацепин Э.С.* Характеристики протоколов в mesh-сетях // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2015. – № 1. – С. 11-11.
20. *Pysarenko V., Gulchak O., Pisarenko J.* Technology for Improve the Safety of Ships from Methane Emissions Using UAVs // International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – 2020.

REFERENCES

1. *Vikhlyayeva V.V.* Dinamicheskaya detsentralizovannaya energonezavisimaya besprovodnaya set' ispol'zovaniem Mesh-seti na sudne [Dynamic decentralized non-volatile wireless network using Mesh on the ship], *Vestnik magistratury* [Bulletin of the graduate], ed. by E.A. Murzina, 2019, No. 4-1 (91), pp. 26-27.
2. *Lisnichuk A.A.* Protsedura mnogokriterial'nogo sinteza signalov s pryamym rasshireniem spektra dlya adaptatsii kognitivnykh radiosistem peredachi informatsii k slozhnoy pomekhovoy obstanovke [The procedure of multicriteria synthesis of signals with direct spectrum expansion for the adaptation of cognitive radio systems of information transmission to a complex interference environment], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2018, No. 4, Issue 66, Part 1, pp. 9-15.
3. IEEE Std 802.15.4-2015, September, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2015.
4. *И'ныкха Н., Борисов А.П.* Yacheistaya topologiya seti Zigbee [Zigbee Mesh Network Topology], *Sovremennye tekhnologii v mirovom nauchnom prostranstve: Sb. statey* [Modern technologies in the world scientific space: Collection of articles]. Ufa, 2017, pp. 78-80.
5. *Park P., Di Marco P., Soldati P., Fischione C., Johansson K.H.* A Generalized Markov Chain Model for Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4, *Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE 6th International Conference, Macau, 2013*, pp. 130-139.
6. *Popkov G.V.* Mesh-seti: perspektivy razvitiya, vozmozhnye primeneniya [Mesh networks: development prospects, possible applications], *Vychislitel'nye i setevye resursy* [Computing and network resources]. Novosibirsk, 2012, pp. 74-79.

7. *Vishnevskiy V.V., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V.* Entsiklopediya Wi-Max. Put' k 4G [Wi-Max Encyclopedia. The path to 4G]. Tekhnosfera, 2010.
8. *Olifer V.G., Olifer N.A.* Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Sankt-Peterburg, 2016, 992 p.
9. *Pluzhnikov A.A.* Marshrutizatsiya v besprovodnykh Ad-hoc setyakh, osnovannaya na topologicheskikh svoystvakh seti [Routing in wireless Ad-hoc networks based on network topological properties], *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii* [Methods and devices for transmitting and processing information], 2015, pp. 164-169.
10. *Hongwei Li, Zhongning Jia; Xiaofeng Xue.* Application and Analysis of ZigBee Security Services Specification, *Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, China, 2010.*
11. *Muthu Ramya C., Shanmugaraj M., Prabakaran R.* Study on ZigBee technology, *3rd International Conference on Electronics Computer Technology, India, 2011.*
12. *Shabliy G.F., Anipko O.B.* Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti ot potentsial'no opasnykh sudov s ispol'zovaniem sistemy monitoringa sudokhodstva [Ensuring environmental safety from potentially dangerous vessels using the navigation monitoring system], *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* [Information management and processing systems], 2015, pp. 92-94.
13. *Mudrov A.A., Kemaykin V.K.* Metodika obrabotki otrazhennogo radiolokatsionnogo signala v interesakh raspoznavaniya tseli tipa kvadrokopter [The technique of processing the reflected radar signal in the interests of recognizing a quadrocopter-type target], *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya TvGTU* [All-Russian Scientific and Practical Conference of TvSTU, 2019], pp. 78-80.
14. Bezopasnost' setey 802.11 – osnovnye ugrozy. Khabr. 2012 [The security of 802.11 networks are the main threats. Habr. 2012]. Available at: <https://habr.com/ru/post/151126/> (accessed 05 March 2021).
15. Standart IEEE 802.15.4z. Khabr. 2019 [IEEE 802.15.4z standard. Habr. 2019]. Available at: <https://habr.com/ru/post/457876/> (accessed 06 March 2021).
16. *Yakhiev I.D.* Klient-servernaya sistema na osnove besprovodnoy seti standarta IEEE 802.15.4 [Client-server system based on IEEE 802.15.4 wireless network], *Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet «Vysshaya shkola ekonomiki»* [National Research University Higher School of Economics], 2014, pp. 1-21.
17. Protokoly byvayut raznye... BACnet. 2017 [Protocols are different... BACnet. 2017]. Available at: http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT_ID=746 (accessed 19 February 2021).
18. *Zhukov M.O., Ivanov A.E., Merkulov I.V., Narymskiy B.V.* Ispol'zovanie setey standarta IEEE 802.15.4/ZigBee v sistemakh shakhtnoy avtomatizatsii [The use of IEEE 802.15.4/ZigBee standard networks in mine automation systems], *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii tekhnicheskimi sistemami i tekhnologicheskimi protsessami* [Information technologies in the management of technical systems and technological processes], 2012, pp. 42-46.
19. *Zatsepin E.S.* Kharakteristiki protokolov v mesh-setyakh [Characteristics of protocols in mesh networks], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2015, No. 1, pp. 11-11.
20. *Pysarenko V., Gulchak O., Pisarenko J.* Technology for Improve the Safety of Ships from Methane Emissions Using UAVs, *International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. 2020.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент А.А. Полупанов.

Родыгина Ирина Владимировна – Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова; e-mail: habarova@mail.ru; г. Новороссийск, Россия; тел.: +79282284417; кафедра радиоэлектроники и информационных технологий; к.т.н.; доцент.

Новак Вадим Александрович – e-mail: Vadim05580@mail.ru; тел.: +79180558085; магистрант.

Rodygina Irina Vladimirovna – Admiral Ushakov Maritime State University; e-mail: habarova@gmail.ru, Novorossiysk, Russia; phone: +79282284417; the department of radioelectronics and information technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Novak Vadim Alexandrovich – e-mail: Vadim05580@mail.ru; phone: +79180558085; master's student.

М.Е. Дробынин, О.Д.М. Аль-Таи, Е.В. Филина, П.А. Львов, С.А. Кузин

**КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
В АВИАЦИОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ**

В настоящее время пьезорезистивные датчики давления (ПДД) широко применяются в различных микроэлектронных устройствах, используемых в авиационной технике. Поведение электрического сигнала таких ПДД в основном зависит от температуры окружающей среды. Известно, что на температурный дрейф выходного сигнала ПДД влияют различные факторы: температурный эффект, зависимость сопротивления чувствительного элемента от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга мембраны датчика и подложки от температуры и др. Установлено, что разработанная ранее аналитическая калибровочная модель выходного сигнала ПДД, учитывающая отдельные температурные эффекты, не позволяет измерять давление с требуемой точностью в диапазоне изменения температур, характерном для авиационной техники, — от минус 60 до 140 °С. Поэтому для описания зависимости выходного сигнала ПДД от измеряемого давления и температуры используются традиционные полиномиальные математические модели. В работе используется традиционный подход, когда зависимость выходного напряжения от давления представляется с помощью полинома относительно невысокого порядка, а зависимости коэффициентов этого полинома от температуры также задаются соответствующими полиномами. К сожалению, температурные зависимости коэффициентов адекватно описываются только полиномами высокого порядка (не менее 7), что усложняет процедуру идентификации модели и ведет к ошибкам вычислений. Поэтому авторы предложили искать зависимости коэффициентов от температуры в виде кубических сплайнов. В работе подробно описана методика идентификации рассматриваемой полиномиальной модели и получены выражения для корректировки показаний ПДД при измерениях давления в широких температурных пределах. С целью экспериментального подтверждения работоспособности предложенного метода была использована интеллектуальная промышленная автоматизированная система градуировки ПДД, описанная в работе. Показано, как с ее помощью можно снимать экспериментальные данные для градуировки показаний датчика в широких температурных пределах, и описана процедура идентификации математической модели датчика давления, необходимой для минимизации затрат на его сертификацию. Приведены результаты экспериментальных исследований конкретных ПДД, используемых в авиационной технике.

Пьезорезистивный датчик давления; микроэлектромеханический датчик; полиномиальная модель; кубические сплайны; автоматизированная система градуировки.

M.E. Drobynin, O.D.M. Al-Tai, E.V. Filina, P.A. L'vov, S.A. Kuzin

**TEMPERATURE EFFECT COMPENSATION IN AVIATION
PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS**

Currently, piezoresistive pressure sensors (PDS) find expanded applications in various microelectronic devices used in aviation technology. The behavior of the electrical signal of such PDS mainly depends on the ambient temperature. It is known that the temperature drift of the PDS output signal is influenced by various factors: the temperature effect, the dependence of the resistance of the sensitive element on the concentration of impurities, the dependence of the Young's modulus of the sensor membrane and substrate materials on temperature, etc. It was found that the previously developed analytical calibration model of the sensor output signal, which takes into account the models describing individual temperature effects, does not allow the pressure to be measured with the required accuracy in the temperature range characteristic of aviation equipment from -60 °C to 140 °C. Therefore, conventional polynomial mathematical models are used to describe the dependence of the PDS output signal on the measured pressure and temperature. The work uses a traditional approach, when the dependence of the output voltage on pressure is

represented using a polynomial of relatively low order, and the dependences of the coefficients of this polynomial on temperature are also specified by the corresponding polynomials. Unfortunately, the temperature dependences of the coefficients are adequately described only by high-order polynomials (at least 7), which complicates the model identification procedure and leads to computation errors. Therefore, the authors proposed to look for the dependence of the coefficients on temperature in the form of cubic splines. The paper describes in detail the identification technique of the polynomial model under consideration and obtains expressions for correcting the PDS readings when measuring pressure in wide temperature ranges. In order to experimentally confirm the efficiency of the proposed method, an intelligent industrial automated system for the calibration of traffic rules, described in the work, was used. It is shown how it can be used to take experimental data to calibrate the sensor readings over a wide temperature range, and the procedure for identifying the mathematical model of the pressure sensor required to minimize the cost of its certification is described. The results of experimental studies of specific pressure sensors used in aviation technology are presented.

Piezoresistive pressure sensor; microelectromechanical sensor; polynomial model; cubic splines; automated calibration system.

1. Введение. Развитие авиационной техники является одной из приоритетных задач нашего государства. Неотъемлемыми составными элементами всех авиационных транспортных систем являются датчики давления и температуры, которые используются в топливных и гидравлических каналах, системах противообледенения крыльев, предотвращения пожаров на борту и т.д. Одной из задач, с которыми сталкиваются разработчики при проектировании датчиков для авионики, – сохранение их работоспособности и заданных технических характеристик при воздействии различных дестабилизирующих факторов окружающей среды, в частности значительных изменений температуры.

Последние достижения в производстве микроэлектронной техники позволили все шире использовать в измерительном процессе микроэлектромеханические (МЭМ) датчики давления (ДД) [1–14]. Их достоинства: простота применения, небольшие размеры, низкая стоимость и высокая надежность. Недостатком данного вида ДД является зависимость выходного сигнала от температуры, что вызвано температурным дрейфом, включая дрейф нуля усилителей, и изменением чувствительности ДД, обусловленной существенной зависимостью полупроводниковых приборов от температуры [2, 3, 5, 7, 10, 13].

Как правило, в качестве формирователя сигналов пьезоэлектрического ДД (ПДД) используется мостовая схема Уитстона на постоянном токе [5, 6, 8, 10–12, 15, 16]. Выравнивание температурных коэффициентов пьезорезистивных сопротивлений каждого из плеч моста является сложной технической проблемой. Дело в том, что при функционировании ДД резисторы, чувствительные к изменению температуры, сами нагреваются. Из-за различной чувствительности пьезорезисторов (ПР) в плечах мостовой схемы возникает неравномерное распределение температуры внутри ДД. Чувствительность ДД зависит от температурных коэффициентов ПР, которые, в свою очередь, зависят от температуры. В то же время на функциональную связь чувствительности и температурных коэффициентов также влияют тип преобладающих примесей и их концентрации в ПР, температурные характеристики продольного пьезорезистивного коэффициента и модуля Юнга материала, из которого изготовлены ПР, что может оказывать сильное влияние на температурный дрейф чувствительности [1–3, 5–9, 15–17]. Температурный дрейф ДД во многом ограничивает их точность измерения и сферу применения. Для большей температурной стабильности ДД предлагается использовать различные процедуры температурной компенсации [11, 15, 16, 18–24].

Однако в соответствии с последними требованиями ДД для авиационной техники должны обеспечивать относительную погрешность измерения не хуже 0,25 % от измеряемой величины в диапазоне температур от -60 до 140 °С. Поэтому очень сложно предложить эффективную процедуру компенсации влияния температуры на характеристики ДД в таком широком диапазоне ее изменения.

В работах [25–27] учитывалось влияние температуры на точность измерения ПДД с помощью построения зависимости выходного сигнала датчика от измеряемого давления и температуры окружающей среды в виде полиномиальной математической модели. Коэффициенты при степенях полиномов у данной модели идентифицируются на стадии градуировки ПДД. В данной работе авторы предлагают упрощение процедуры идентификации путем аппроксимации получающихся экспериментальных градуировочных кривых кубическими сплайнами. Описываемая методика прошла проверку при обработке реальных экспериментальных данных, а достигаемая точность измерения сравнивается с точностью методов, реализованных в [26, 28, 29].

2. Анализ известных методик компенсации температурных эффектов. В работах [28–30] рассмотрены некоторые ключевые факторы, влияющие на температурный дрейф ПДД: эффект температуры и зависимость сопротивления ПД от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга от температуры T и т.д. На основе данного анализа в [29] разработана модель выходного сигнала ПДД:

$$V_0 = \frac{1}{q_0} (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + T(q_5 + q_6) + q_7, \quad (1)$$

где параметры q_0, q_1, \dots, q_7 являются сложными функциями от сопротивлений ПР в плечах мостовой схемы при исходной температуре ($T=300$ °К), температурных коэффициентов этих резисторов, продольного ПР коэффициента при температуре $T=300$ °К, энергии Ферми, постоянной Больцмана, модуля Юнга кремния и коэффициента Пуассона, коэффициентов температурного расширения кремниевой тонкой мембраны и материала подложки и т.д.

В работе [29] приведены результаты идентификации модели (1) из экспериментальных данных, полученных в ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева» (г. Энгельс, Саратовская обл.) для ПДД типа ДД-М. В частности, приведены графики зависимостей выходного сигнала от давления в диапазоне от 1 до 10^7 Па и температуры в диапазоне от -30 до $+50$ °С. Этот тип датчика предназначен для измерения абсолютного или относительного давления от 10^5 до 10^7 Па (от 1 до 100 бар) [29, 30]. Материалом, использованным для его изготовления, является двусторонний полированный монокристалл кремния n -типа с удельным сопротивлением от 3 до 5 Ом/см. Четыре ПР p -типа, сформированные диффузией бора на поверхности диафрагмы датчика, образуют мост Уитстона. Два ПР находятся в радиальном направлении и два других – в поперечном направлении рядом с краем диафрагмы. Диафрагма представляет собой квадрат площадью $1,08$ мм². Толщина диафрагмы составляет от 32 до 160 мкм, в зависимости от номинального интервала измеряемых давлений. После производства пластина крепится анодированием к стеклянной подложке. Чтобы сделать ДД пригодным для промышленного применения и с целью обеспечения оптимальных условий функционирования чувствительного элемента (ЧЭ), должен быть использован специальный корпус. Помещенный в такой корпус ЧЭ, по сути, и есть ДД.

Попытка найти оценки коэффициентов q_i , входящих в (1), из экспериментальных градуировочных данных в требуемом диапазоне температур от -60 до $+140$ °С оказалась неудачной из-за большого разброса значений этих коэффициен-

тов от образца ПДД к образцу. Более того, вследствие нелинейности мостовой схемы модель (1) неадекватно описывала выходной сигнал датчика на краях температурного диапазона при низких (< -30 °C) и высоких (> 80 °C) температурах. Возможные методы компенсации температурной погрешности ДД подробно описаны в работах [11, 15, 16, 18–24], но авторы в них рассматривали существенно более узкие диапазоны изменения температур. Поэтому предлагаемые методики не подходят для учета температурных эффектов в ПДД на низких и высоких температурах, требуемого для точного измерения давления в авиационной технике. В диапазоне температур от -60 до $+140$ °C выходной сигнал ПДД зависит от приложенного давления практически линейно. Но для адекватного описания этой зависимости лучше использовать полиномиальную модель невысокого порядка (≤ 3).

Интересные возможности устранения погрешностей измерения давления в широком диапазоне температур, характерные для мостовой схемы, описаны в работах [31–34], где предложено использовать новую схему формирователя сигнала, названную «петлей переменного тока». Однако публикации по практической реализации нового формирователя пока авторам не известны.

3. Предлагаемая методика компенсации влияния температуры

3.1. Постановка задачи. Изначально предполагается, что ДД используется для проведения измерений в заданном диапазоне давлений $[P_{min}, P_{max}]$ и известном диапазоне температур $[T_{min}, T_{max}]$. Кроме того, предполагается, что контроллер давления и климатические камеры, входящие в состав экспериментальной градуировочной установки, позволяют задавать данные параметры внутри указанных диапазонов с требуемой точностью.

Поскольку вид функциональной зависимости $U = f(P, T)$, связывающей выходной сигнал датчика u с измеряемым давлением P и температурой окружающей среды T , не известен, то математическую модель f можно найти только приближенно в результате экспериментальных исследований с помощью методов аппроксимации характеристик датчика, полученных опытным путем. Для аппроксимации используются полиномиальные зависимости [25–27], в частности, кубические сплайны [35]. Помимо этого, предполагается наличие ошибок измерения выходных сигналов u , т.е. реально измеряется следующая величина:

$$U = f(P, T) + \xi,$$

где ξ – некоторая случайная погрешность измерения.

Для компенсации влияния случайных ошибок измерения на точность искомого математической модели следует в каждой отдельной исследуемой экспериментально точке плоскости с координатами (P_i, T_j) проводить не одно измерение сигнала с выхода датчика, а серию из L измерений и вычислять осредненное значение сигнала в данной точке [26].

На этапе получения экспериментальных данных диапазоны давлений $[P_{min}, P_{max}]$ и температур $[T_{min}, T_{max}]$ равномерно разбиваются на N_P и N_T интервалов, соответственно (рис. 1). За основу взята методика поиска математической модели выходного сигнала ПДД из работ [22, 25, 36, 37], в соответствии с которой сначала находятся зависимости $U(T_j) = f(P, T_j)$, $P \in [P_{min}, P_{max}]$ для всех выбранных значений $T_j \in [T_{min}, T_{max}]$, ($j = 0, 1, \dots, N_T$; $T_0 = T_{min}$, $T_{N_T} = T_{max}$). Т.е. на первом этапе экспериментальные данные, полученные для фиксированной температуры T_j , аппроксимируются полиномом некоторой степени n . На втором этапе происходит поиск зависимости коэффициентов полученного полинома от температуры.

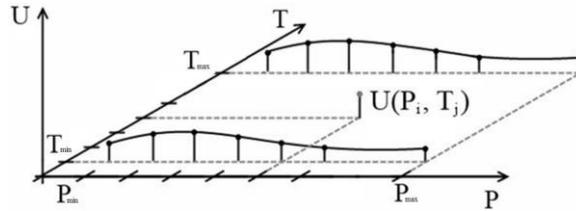


Рис. 1. Схема снятия исходных данных для процедуры идентификации

На основании снятых экспериментальных данных можно аппроксимировать характеристику датчика $u = h(P)$ интерполяционным полиномом, степень которого n подбирается с использованием известных методов математической статистики [36, 37]:

$$U = h(P) = \sum_{r=0}^n a_r P^r \cdot \quad (2)$$

Далее зависимость каждого коэффициента a_r от температуры определяется полиномом вида:

$$a_r = a_r(T) = \sum_{k=0}^K c_{kr} T^k, \quad (r=0, 1, \dots, n), \quad (3)$$

где K – порядок модели; c_{kr} – коэффициенты регрессии, оценки которых вычисляются и далее вводятся в память микропроцессора ПДД.

Исследования показали, что зависимость (2) выходного сигнала от измеряемого давления у МЭМ ПДД адекватно описывается полиномом второй или третьей степени в зависимости от конкретного образца. Однако результаты поиска зависимостей коэффициентов этого полинома от температуры по методике, описанной в [25–27, 30], показали, что порядок моделей (3) получается достаточно высоким ($K = 7 \div 9$) и сильно разнится даже для однотипных датчиков из одной партии. В этом случае находить коэффициенты этих зависимостей по методу наименьших квадратов (МНК) сложно из-за высокой размерности получающихся матриц эксперимента [36, 37] и накапливающихся ошибок вычислений. Поэтому было решено аппроксимировать зависимости коэффициентов полинома (2) от температуры кубическими сплайнами, что является частным случаем кусочно-полиномиальной интерполяции. Для этого весь рассматриваемый диапазон температур $[T_{min}, T_{max}]$ разбивается на M поддиапазонов, в каждом из которых зависимость коэффициента регрессии a_r ищется в виде полинома степени не выше третьей:

$$a_r(T) = S_r(T) = \sum_{m=1}^M S_{mr}(T), \quad (r=0, 1, \dots, n), \quad (4)$$

где функции $S_{mr}(T)$ описывают зависимость коэффициента a_r в поддиапазоне с номером m кубическим сплайном. В остальных поддиапазонах эта функция равна нулю (рис. 2). То есть:

$$S_{mr}(T) = \begin{cases} \sum_{j=0}^3 s_{jmr} T^j & \text{при } T_{m_{min}r} \leq T \leq T_{m_{max}r}; \quad (r=0, 1, \dots, n), \\ 0 & \text{при } T < T_{m_{min}r} \cup T > T_{m_{max}r}, \end{cases} \quad (5)$$

где $T_{m_{min}r}$ и $T_{m_{max}r}$ – соответственно, наименьшая и наибольшая температуры для диапазона с номером m .

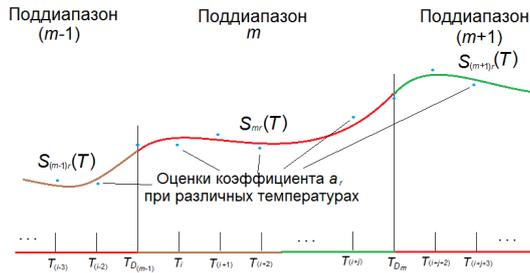


Рис. 2. Аппроксимация зависимости коэффициента a_r кубическими сплайнами $S_{mr}(T)$ в различных поддиапазонах. Вне «своего» диапазона функции $S_{mr}(T) = 0$; T_{D_m} – «граничные температуры» выбранных диапазонов

При этом функция $S_r(T)$ должна быть непрерывной и иметь первую производную во всем диапазоне $[T_{min}, T_{max}]$. Если положить, что весь диапазон разбивается на поддиапазоны в температурных точках T_{D_m} так, что $T_{min} = T_{1_{min}r}$, $T_{(m-1)_{max}r} = T_{D_{(m-1)}}$, $T_{D_{(m-1)}} = T_{m_{min}r}$, $T_{D_{(m-1)}} = T_{max}$, $m = 2, \dots, M$, то должны выполняться следующие условия на границах поддиапазонов:

$$\begin{cases} S_{(m-1)r}(T_{(m-1)_{max}r}) = S_{mr}(T_{m_{min}r}); \\ \frac{dS_{(m-1)r}(T_{(m-1)_{max}r})}{dT} = \frac{dS_{mr}(T_{m_{min}r})}{dT}, \end{cases} \quad (m=2, 3, \dots, M). \quad (6)$$

Задача заключается в идентификации на основе полученных экспериментальных данных математической модели выходного сигнала ПДД (2) и (3), когда математические модели коэффициентов регрессии задаются соотношениями (4), (5) и удовлетворяют граничным условиям (6).

3.2. Решение уравнений идентификации ДД. На первом этапе процедуры идентификации для каждой заданной температуры из установленного диапазона $T_j \in [T_{min}, T_{max}]$, ($j = 0, 1, \dots, N_T$; $T_0 = T_{min}$, $T_{N_T} = T_{max}$) поиск оценок коэффициентов регрессии модели (2) производится стандартными методами, широко используемыми в математической статистике [36, 37]. В результате получаются оценки коэффициентов $a_0(T_j)$, $a_1(T_j)$, ..., $a_n(T_j)$. Эти оценки заносятся в таблицу (таблица 1) и являются основой для второго этапа идентификации. Для упрощения задачи идентификации диапазон $[T_{min}, T_{max}]$ разбивается на одни и те же поддиапазоны для каждого коэффициента регрессии $a_r(T_j)$. Желтым цветом выделен поддиапазон номер m .

На втором этапе процедуры идентификации зависимости каждого коэффициента регрессии a_r ($r = 0, 1, \dots, n$) от температуры осуществляется аппроксимация с помощью кубических сплайнов (4) с учетом граничных условий (5) и (6). При этом предполагается, что в каждый из выбранных поддиапазонов попадает не менее пяти значений температуры. Внутри каждого поддиапазона коэффициенты соответствующего кубического сплайна находятся в соответствии с взвешенным МНК, а веса оценок из таблицы 1 находятся при поиске коэффициентов регрессии (2) из анализа соответствующих матриц ошибок [37].

Пусть в поддиапазоне с номером m ($m = 1, 2, \dots, M$) зависимость коэффициента регрессии a_r ($r = 0, 1, \dots, n$) аппроксимируется кубическим сплайном:

$$a_{rm}(T) = S_{rm}(T) = s_{0rm} + s_{1rm} \cdot T + s_{2rm} \cdot T^2 + s_{3rm} \cdot T^3.$$

Тогда коэффициенты s_{jrm} должны удовлетворять следующей системе линейных уравнений (для упрощения записи индекс r в дальнейшем опущен и подразумевается, что речь идет об аппроксимации зависимости от температуры коэффициента a_r):

Таблица 1

Оценки коэффициентов полиномиальной регрессии (1) для выбранных температур из диапазона $[T_{\min}, T_{\max}]$.

Температура	Номер коэффициента регрессии			
	0	1	...	n
T_{\min}	$a_0(T_{\min})$	$a_1(T_{\min})$	...	$a_n(T_{\min})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
$T_{D_{(m-1)}}$	$a_0(T_{D_{(m-1)}})$	$a_1(T_{D_{(m-1)}})$	...	$a_n(T_{D_{(m-1)}})$
$T_{m_{\min}+1}$	$a_0(T_{m_{\min}+1})$	$a_1(T_{m_{\min}+1})$	...	$a_n(T_{m_{\min}+1})$
$T_{m_{\min}+2}$	$a_0(T_{m_{\min}+2})$	$a_1(T_{m_{\min}+2})$	...	$a_n(T_{m_{\min}+2})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
$T_{m_{\max}-1}$	$a_0(T_{m_{\max}-1})$	$a_1(T_{m_{\max}-1})$	...	$a_n(T_{m_{\max}-1})$
T_{D_m}	$a_0(T_{D_m})$	$a_1(T_{D_m})$	...	$a_n(T_{D_m})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
T_{\max}	$a_0(T_{\max})$	$a_1(T_{\max})$	...	$a_n(T_{\max})$

$$a_m(T_j) = \sum_{i=1}^3 s_{im} T_j^i, \quad (j = m_{\min}, m_{\min}+1, \dots, m_{\max}; m = 1, 2, \dots, M). \quad (7)$$

Всего в системе (7) $4M$ неизвестных коэффициентов s_{im} , которые в силу граничных условий (6) должны удовлетворять следующей системе линейных ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^3 s_{i(m-1)} T_{D(m-1)}^i = \sum_{i=0}^3 s_{im} T_{D(m-1)}^i; & (m=2, 3, \dots, M), \\ s_{1(m-1)} + 2s_{2(m-1)} T_{D(m-1)} + 3s_{3(m-1)} T_{D(m-1)}^2 = s_{1m} + 2s_{2m} T_{Dm} + 3s_{3m} T_{Dm}^2, \end{cases} \quad (8)$$

В результате получилась классическая задача поиска оценок неизвестных коэффициентов системы линейных уравнений (6) взвешенным МНК при наличии линейных ограничений (7), которая решается известными методами [38]. На основании решения находятся оценки всех коэффициентов кубических сплайнов, которые запоминаются в памяти микропроцессора ПДД и используются для уточнения показаний датчика в процессе измерений.

4. Идентификация моделей реальных ПДД. С целью проверки разработанной методики идентификации моделей ПДД, обеспечивающей компенсацию их температурной погрешности, были проведены экспериментальные исследования, по результатам которых строились градуировочные зависимости рабочих характеристик МЭМ ПДД, выпускаемых ЭОКБ «Сигнал», от давления и температуры.

4.1. Описание экспериментальной установки. В рамках решения поставленной задачи была создана автоматизированная система контроля технологических процессов и испытания ПДД в нормальных и экстремальных климатических условиях [19, 22, 25]. На рис. 3 показаны внешний вид и упрощенная структурная схема этой системы.

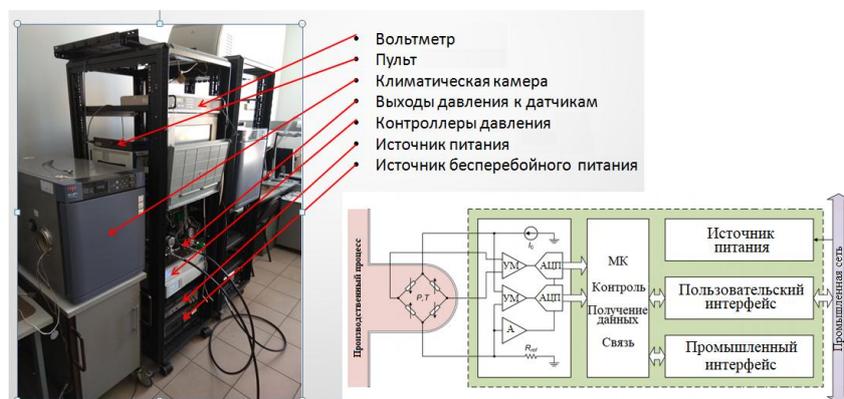


Рис. 3. Автоматизированная система градуировки ПДД и ее упрощенная структурная схема

Основные функции системы: 1) управление технологическим оборудованием; 2) сбор/обработка данных; 3) электрическое питание ПДД; 4) задание требуемого давления и обеспечение необходимой для испытаний температуры; 5) ввод/отображение информации.

В состав аппаратной части системы входят: 1) *PXI 1042* – стойка (вмещает восемь слотов) с интегрированным контроллером на базе процессора *Intel* с предустановленной ОС *Windows 10*; 2) модуль интерфейса *Arinc 429 PXI 429-3U-16*; 3) вакуумный насос *BECKER U-3.6*; 4) задатчик давления *Mensor CPC8000* – осуществляет подачу испытательного давления на ДД; 5) климатические камеры (камера тепла *ESPEC PNH-101M*, камера холода *ESPEC MC-811*) – задают требуемые значения испытательных температур; 6) программируемый источник питания (АКИП 1118) – обеспечивает питание ПДД, проходящих исследование; 7) коллектор – осуществляет распределение испытательного давления между определенным числом ПДД.

Различные температуры окружающей среды устанавливались в диапазоне от $T_{min} = -60^{\circ}\text{C}$ до $T_{max} = 145^{\circ}\text{C}$ с шагом 5°C , когда датчики помещаются в камеры холода или нагревательные печи. При каждой из указанных температур давление изменялось с равномерным шагом $0,35$ атм от $P_{min} = 0,1$ атм до $P_{max} = 7,1$ атм. Для каждой установленной температуры производится измерение давлений из заданного диапазона. При этом в каждой выбранной точке давление измерялось несколько раз, когда давление сначала повышалось от P_{min} до P_{max} , а потом понижалось от P_{max} до P_{min} . Типичные результаты измерений сигнала на выходе датчика показаны в табл. 2.

Таблица 2

Типичные данные измерения на выходе ПДД

U , В	P , атм	U , В	P , атм
0,00003125	0,1	2,97066406	1,15
0,00003125		2,97063281	
0,00000010		2,97070313	
0,00003125		2,97070313	
0,00003125		2,97070313	

4.2. Результаты экспериментального исследования. Для всех выбранных температур из указанного диапазона на основании снятых данных строились полиномиальные зависимости (2) с помощью специально разработанного программного обеспечения. В качестве сигнала U брались средние значения напряжений с выхода датчика при соответствующих давлении и температуре (усреднение проводилось по пяти значениям сигнала, как показано в табл. 2). В результате проведенного исследования было установлено, что адекватно зависимость выходного сигнала от измеряемого давления описывается полиномами второго порядка ($n = 2$).

После этого строились зависимости коэффициентов регрессии a_r ($r = 0, 1, 2$) от температуры с помощью кубических сплайнов (4)–(8) по методике, изложенной в разделе 3 (рис. 4). Для этого тоже было разработано специальное программное обеспечение. В качестве примера на рис. 6 показан характерный вид зависимости коэффициента a_1 от температуры, когда в каждом из трех выделенных поддиапазонов она аппроксимируется кубическим сплайном.

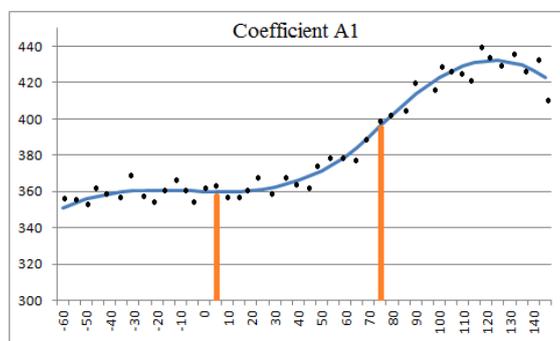


Рис. 6. Аппроксимация коэффициента a_1 в диапазоне от -60 до 140 °С: красные линии – границы трех выбранных поддиапазонов, в которых зависимость аппроксимируется соответствующим кубическим сплайном, черные точки – оценки коэффициента a_1 для различных температур

Анализ полученных оценок коэффициентов a_r при различных температурах из заданного диапазона показал, что этот диапазон можно разбить на три поддиапазона ($M = 3$) одинакового размера. Тогда каждый из поддиапазонов содержит по 14–15 значений температуры. Были выбраны следующие границы поддиапазонов $T_{D_1} = 5^\circ\text{C}$ и $T_{D_2} = 75^\circ\text{C}$.

Для наглядности на рис. 5 показана поверхность распределения отклонений измерительных данных от интерполяционной модели, построенной по описанной методике (2)–(8), когда зависимость от давления описывалась полиномом второго порядка, а зависимости всех коэффициентов данного полинома от давления – кубическими сплайнами.

Из последнего рисунка видно, что относительное отклонение измеренных значений выходного напряжения МЭМ ПДД от предсказанных моделью (2)–(8) не превышает 0,1 % в требуемом диапазоне давлений и температур. Это позволяет проводить измерения давления с точностью, не худшей 0,25 % от измеряемой величины.

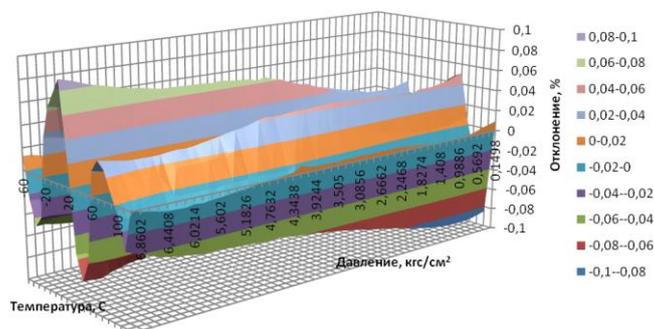


Рис. 5. Распределение ошибок интерполяции в поле давлений и температур

Заключение. В работе исследована методика компенсации влияния температуры на точность измерения давления с помощью МЭМ ПДД, применяемых в авиационной технике. Установлено, что полученная ранее модель [29, 30] выходного сигнала ПДД не позволяет измерять давление с требуемой точностью в диапазоне температур от -60 до 140 °C. По этой причине была использована традиционная полиномиальная модель [27], адекватно описывающая выходной сигнал ПДД в требуемом диапазоне температур.

Для упрощения процедуры обработки экспериментальных данных в ходе идентификации полиномиальной модели и снижения ошибок вычислений предложено использовать описание коэффициентов модели (2) зависимости выходного сигнала от измеряемого давления в форме кубических сплайнов. Подробно описана методика градуировки и получены выражения для расчета неизвестных коэффициентов модели.

Предложенный подход был проверен на реальных МЭМ ПДД, выпускаемых ЭОКБ «Сигал» им. А.И. Глухарева». Полученные результаты показали, что предлагаемая упрощенная методика градуировки позволяет достичь требуемых точностей измерения давления во всем температурном диапазоне, характерном для авиационной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Yozo K.* A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon // IEEE Trans. on Electron Device. – 1982. – No. 29 (1). – P. 64-70.
2. *Boukabache A., Pons R.* Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor // Electronics Letters. – 2002. – No. 38 (7). – P. 342-343.
3. *Aljancic U., Resnik D., Vrtacnik D., Mozek M., Amon S.* Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor // Proc. of the 11-th Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON. – Cairo, Egypt: IEEE, 2002. – P. 36-40.
4. *Ицкович Э.Л.* Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства // Датчики и системы. – 2002. – № 2. – С. 42-47.
5. *Mohamed R.L., Abdelhafid C.* Influence of temperature on the offset voltage of piezoresistive pressure sensors // Int. Conf. on Computational Methods in Science and Engineering. – Corfu, GREECE: AIP, 2007. – P. 25-30.
6. *Chiou J.A., Chen S.* Pressure nonlinearity of micromachined piezoresistive pressure sensors with thin diaphragms under high residual stresses // Sensors and Actuators: Ser. A – Physical. – 2008. – No. 147 (1). – P. 332-339.
7. *Frantlović M., Jokić I., Lazio Ž., Vukelić B., Obradov M., Vasiljević-Radović D.* Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors // Proc. of the 29th Int. Conf. on Microelectronics MIEL. – Belgrade, Serbia: IEEE, 2014. – P. 159-161.

8. *Першенков П.П., Тюрин Е.А., Баширов О.В.* Интеллектуальные датчики в системе измерения давления // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2009. – С. 451-452.
9. *Fraga M.A., Koberstein L.L.* An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors // 2012 Workshop on Engineering Applications (WEA). – Bogota, Columbia, 2012. – DOI: 10.1109/WEA.2012.6220091.
10. *Львов А.А., Коновалов Р.С.* Высокотемпературные датчики давления // Надежность и качество: Тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза, ПГУ, 2014. – С. 48-50.
11. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А.* Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 149-158.
12. *Львов А.А., Коновалов Р.С.* Малогабаритные датчики давления на основе кремниевых поликристаллических структур с диэлектрической изоляцией // Датчики и системы. – 2015. – № 8 (195). – С. 29-32.
13. *Nie M., Gao Y.* The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor // AIP Advances. – 2017. – No. 7. – P. 111-117.
14. *Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Кузин С.А.* Распределенная система датчиков для авионики, управляемая по беспроводному радиоканалу // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2017. – С. 100-103.
15. *Дробынин М.Е., Львов П.А., Львов А.А., Торопова О.А.* Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: анализ метода // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 85-88.
16. *Дробынин М.Е., Львов П.А., Львов А.А., Торопова О.А.* Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: результаты эксперимента // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 409-413.
17. *Tan Y.Y., Hong Y.U., Huang Q.A., Liu T.Q.* Effect of temperature on the Young's modulus of silicon nano-films // Chinese J. of Electron Devices. – 2007. – No. 30 (3). – P. 755-758.
18. *Scripal E.N., Ermakov R.V., Gutcevitch D.E., L'vov A.A., Sytnik A.A.* Test Methods and Results of the MEMS Inertial Sensors // Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 1000-1003.
19. *Doelle M.B.* Temperature Extraction from a Pressure Sensor. – US Patent No. 8,082,796 B1. – Silicon Microstructures Inc., USA, 2011.
20. *Akbar M., Shanblatt M.A.* Temperature Compensation of Piezoresistive Pressure Sensors // Sensors and Actuators. – 1992. – Vol. 33, No. 3. – P. 155-162.
21. *Peng K.H., Uang C.M.* The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5343. – P. 292-301.
22. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А., Кузин С.А.* Пьезорезонансный датчик давления повышенной точности // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 142-149.
23. *Gridchin V.A., Kononov R.S., L'vov A.A., Afanasiev M.Y., Danilova O.G.* A Piezoresistive Pressure Sensor Based on Polysilicon Thin Films with Dielectric Insulation // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 191-199.
24. *Kay A., Ivanov M., Schaffer V.* A Practical Technique for Minimizing the Number of Measurements in Sensor Signal Conditioning Calibration // Texas Instruments. Application Rep. SBOA111. – Dallas: Texas Instruments, 2005. – 9 p.
25. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А., Кузин С.А., Булыкин Д.А.* Аппаратное и алгоритмическое обеспечение интеллектуального пьезорезонансного датчика давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 158-164.
26. *Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А., Коновалов Р.С., Хаустов В.В.* Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (77). – С. 154-160.
27. *Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А.* Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2014. – С. 57-59.

28. Дробынин М.Е., Ясюк Н.А., Львов П.А., Ивженко С.П. Исследование микроэлектромеханических кремниевых интеллектуальных датчиков давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП "Лоди", 2019. – С. 293-300.
29. Ясюк Н.А., Дробынин М.Е., Шпрехер М.И., Светлова Э.М., Ивженко С.П., Львов П.А. Исследование влияния температурных эффектов на работу пьезорезистивного датчика давления // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. IX Всерос. науч. конф. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 578-589.
30. Дробынин М.Е., Львов П.А., Ивженко С.П., Торопова О.А. Математическая модель температурных эффектов в кремниевом пьезорезистивном датчике давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП "Лоди", 2019. – С. 384-390.
31. L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing // Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. – P. 279-282.
32. Львов А.А., Гуреев В.В., Пыльский В.А., Шевченко А.А. Применение формирователя сигнала параметрических датчиков «токовая петля» для измерения температуры // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (50). – С. 17-20.
33. L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A., L'vov A.A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors // Proc. of the 2016 Int. Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russia, 2016. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.
34. Кузин С.А., Львов П.А., Львов А.А., Светлов М.С. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3 (188). – С. 29-42.
35. Козлов П.Н., Мельникова Н.И., Львов А.А. Построение математической модели датчика давления методом интерполяции бикубическими сплайнами // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Наука, 2018. – С. 342-347.
36. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 336 с.
37. Мусатов М.В., Львов А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Вып. 4. – № 2 (43). – С. 137-140.
38. Вучков И.Н., Бояджиева Л.Н., Солаков Е.Б. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.

REFERENCES

1. Yozo K. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, *IEEE Trans. on Electron Device*, 1982, No. 29 (1), pp. 64-70.
2. Boukabache A., Pons R. Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor, *Electronics Letters*, 2002, No. 38 (7), pp 342-343.
3. Aljancic U., Resnik D., Vrtacnik D., Mozek M., Amon S. Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor, *Proc. of the 11-th Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON*. Cairo, Egypt: IEEE, 2002, pp. 36-40.
4. Itskovich E.L. Sovremennye intellektual'nye datchiki obshchepromyshlennogo naznacheniya, ih osobennosti i dostoinstva [Modern intelligent sensors for general industrial purposes, their features and advantages], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2002, No. 2, pp. 42-47.
5. Mohamed R.L., Abdelhafid C. Influence of temperature on the offset voltage of piezoresistive pressure sensors, *Int. Conf. on Computational Methods in Science and Engineering*. Corfu, GREECE: AIP, 2007, pp. 25-30.
6. Chiou J.A., Chen S. Pressure nonlinearity of micromachined piezoresistive pressure sensors with thin diaphragms under high residual stresses, *Sensors and Actuators: Ser. A – Physical*, 2008, No. 147 (1), pp. 332-339.

7. Frantlović M., Jokić I., Lazio Ž., Vukelić B., Obradov M., Vasiljević-Radović D. Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors, *Proc. of the 29th Int. Conf. on Microelectronics MIEL*. Belgrade, Serbia: IEEE, 2014, pp. 159-161.
8. Pershenkov P.P., Tyurin E.A., Bashkirov O.V. Intellektual'nye datchiki v sisteme izmereniya davleniya [Intelligent sensors in the pressure measurement system], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2009, pp. 451-452.
9. Fraga M.A., Koberstein L.L. An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors, *2012 Workshop on Engineering Applications (WEA)*. Bogota, Columbia, 2012. DOI: 10.1109/WEA.2012.6220091.
10. L'vov A.A., Konovalov R.S. Vysokotemperaturnye datchiki davleniya [High temperature pressure sensors], *Nadezhnost' i kachestvo: Tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza, PGU, 2014, pp. 48-50.
11. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A. Povyshenie tochnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya [Accuracy improvement of piezoresistive pressure sensors], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 149-158.
12. L'vov A.A., Konovalov R.S. Malogabaritnye datchiki davleniya na osnove kremnievykh polikristalicheskikh struktur s dielektricheskoy izolyatsiey [Small-sized pressure sensors based on silicon polycrystalline structures with dielectric isolation], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2015, No. 8 (195), pp. 29-32.
13. Nie M., Gao Y. The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor, *AIP Advances*, 2017, No. 7, pp. 111-117.
14. L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Kuzin S.A. Raspredeleonnaya sistema datchikov dlya avioniki, upravlyаемая по беспроводному радиоканалу [Distributed wirelessly controlled sensor system for avionics], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2017, pp. 100-103.
15. Drobynin M.E., L'vov P.A., L'vov A.A., Toropova O.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya s pomoshch'yu polumostovoy skhemy: analiz metoda [Temperature error compensation of piezoresistive pressure sensors using a half-bridge circuit: analysis of the method], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2018, pp. 85-88.
16. Drobynin M.E., L'vov P.A., L'vov A.A., Toropova O.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya s pomoshch'yu polumostovoy skhemy: rezul'taty eksperimenta [Temperature error compensation of piezoresistive pressure sensors using a half-bridge circuit: experimental results] *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2018, pp. 409-413.
17. Tan Y.Y., Hong Y.U., Huang Q.A., Liu T.Q. Effect of temperature on the Young's modulus of silicon nano-films, *Chinese J. of Electron Devices*, 2007, No. 30 (3), pp. 755-758.
18. Scripal E.N., Ermakov R.V., Gutcevitch D.E., L'vov A.A., Sytnik A.A. Test Methods and Results of the MEMS Inertial Sensors, *Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 1000-1003.
19. Doelle M.B. Temperature Extraction from a Pressure Sensor. US Patent No. 8,082,796 B1. Silicon Microstructures Inc., USA, 2011.
20. Akbar M., Shanblatt M.A. Temperature Compensation of Piezoresistive Pressure Sensors, *Sensors and Actuators*, 1992, Vol. 33, No. 3, pp. 155-162.
21. Peng K.H., Uang C.M. The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique, *Proc. of SPIE*, 2004, Vol. 5343, pp. 292-301.
22. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A., Kuzin S.A. P'ezorezonansnyy datchik davleniya povyshennoy tochnosti [Problems of control, information processing and transmission], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 142-149.

23. Gridchin V.A., Konovalov R.S., L'vov A.A., Afanasiev M.Y., Danilova O.G. A Piezoresistive Pressure Sensor Based on Polysilicon Thin Films with Dielectric Insulation, *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 191-199.
24. Kay A., Ivanov M., Schaffer V. A Practical Technique for Minimizing the Number of Measurements in Sensor Signal Conditioning Calibration, *Texas Instruments. Application Rep. SBOA111*. Dallas: Texas Instruments, 2005, 9 p.
25. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A., Kuzin S.A., Bulykin D.A. Apparatoe i algoritmicheskoe obespechenie intellektual'nogo p'ezorezonansnogo datchika davleniya [Hardware and algorithmic support of an intelligent piezoresonance pressure sensor], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of control, information processing and transmission: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdatel'skiy dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 158-164.
26. Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., L'vov P.A., Konovalov R.S., Haustov V.V. Metodika kompensatsii temperaturnoy pogreshnosti intellektual'nyh datchikov davleniya [Technique for compensating temperature error of smart pressure sensors], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2014, No. 4 (77), pp. 154-160.
27. Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., L'vov P.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti intellektual'nyh datchikov davleniya [Temperature Compensation for Smart Pressure Sensors], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2014, pp. 57-59.
28. Drobynin M.E., YAsyuk N.A., L'vov P.A., Ivzhenko S.P. Issledovanie mikroelektromekhanicheskikh kremnievyykh intellektual'nyh datchikov davleniya [Investigation of microelectromechanical silicon intelligent pressure sensors], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP "Lodi", 2019, pp. 293-300.
29. Yasyuk N.A., Drobynin M.E., Shprekher M.I., Svetlova E.M., Ivzhenko S.P., L'vov P.A. Issledovanie vliyaniya temperaturnyykh effektiv na rabotu p'ezorezistivnogo datchika davleniya [Investigation of the effect of temperature effects on the operation of a piezoresistive pressure sensor], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. IX Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 578-589.
30. Drobynin M.E., L'vov P.A., Ivzhenko S.P., Toropova O.A. Matematicheskaya model' temperaturnyykh effektiv v kremnievom p'ezorezistivnom datchike davleniya [Mathematical model of temperature effects in a silicon piezoresistive pressure sensor], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP "Lodi", 2019, pp. 384-390.
31. L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing, *Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016, pp. 279-282.
32. L'vov A.A., Gureev V.V., Pyl'skiy V.A., Shevchenko A.A. Primenenie formirovatel'nykh signalov parametricheskikh datchikov «tokovaya petlya» dlya izmereniya temperatury [Application of a signal conditioner of parametric sensors "current loop" for temperature measurement], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2010, No. 4 (50), pp. 17-20.
33. L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A., L'vov A.A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors, *Proc. of the 2016 Int. Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russia, 2016*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.
34. Kuzin S.A., L'vov P.A., L'vov A.A., Svetlov M.S. Povyshenie tochnosti emkostnykh datchikov davleniya dlya aviakosmicheskoy tekhniki [Improving the Accuracy of Capacitive Pressure Sensors for Aerospace Applications], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 29-42.

35. Kozlov P.N., Mel'nikova N.I., L'vov A.A. Postroenie matematicheskoy modeli datchika davleniya metodom interpolyatsii bikubicheskimi splaynami [Construction of a mathematical model of a pressure sensor by interpolation with bicubic splines], *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah: Sb. tr. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Problems of management in socio-economic and technical systems: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference]. Saratov: Nauka, 2018, pp. 342-347.
36. Linnik Yu.V. Metod naimen'shih kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy [Least squares method and the basics of observation processing theory]. Moscow: GIFML, 1958, 336 p.
37. Musatov M.V., L'vov A.A. Analiz modeley metoda naimen'shih kvadratov i metodov polucheniya otsenok [Analysis of Least Squares Models and Estimation Methods], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009, No. 2 (43), Issue 4, pp. 137-140.
38. Vuchkov I.N., Boyadzhieva L.N., Solakov E.B. Prikladnoy lineynyy regressionnyy analiz [Applied linear regression analysis]. Moscow: Finansy i statistika, 1987, 239 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Д.А. Зимняков.

Дробынин Михаил Евгеньевич – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: misha-q@mail.ru; г. Саратов, Россия; аспирант.

Аль-Тай Омар Давуд Мохаммед – e-mail: altai_omar@mail.ru; аспирант.

Филина Екатерина Владимировна – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; аспирантка.

Львов Петр Алексеевич – Энгельское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева; e-mail: peter.lvov@gmail.com; г. Энгельс-19, Россия; к.т.н.; нач. отдела.

Кузин Сергей Александрович – e-mail: kuzinsa@mail.ru; нач. сектора;

Drobynin Mikhail Evgen'evich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: misha-q@mail.ru; Saratov, Russia; postgraduate student.

Al-Tai Omar Davud Mokhammed – e-mail: altai_omar@mail.ru; postgraduate student.

Filina Ekaterina Vladimirovna – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; postgraduate student.

L'vov Peter Alexeevich – OJSC "Signal" Engels Design Bureau named after A.I. Glukharev; e-mail: peter.lvov@gmail.com; Engels-19, Russia; cand. of eng. sc.; department head.

Kuzin Sergey Alexandrovich – e-mail: kuzinsa@mail.ru; research sector head.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-83-93

А.Л. Ляшенко

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

Рассмотрена необходимость регулирования температуры теплоносителя в гидравлических прессах, обеспечивающих горячее склеивание фанеры, регулирование давления в каналах пресса и поддержания технологических параметров на заданном уровне. В качестве объекта управления рассмотрен колонный гидравлический пресс П-714-Б для горячего склеивания фанеры, установленный на Усть-Ижорском фанерном комбинате. В статье представлено описание колонного гидравлического пресса. Для мониторинга параметров представленной установки фанерного производства, предлагается рассмотреть нагревательные плиты пресса и пакеты фанеры как объект с распределенными параметрами. Для разработки математической модели объекта управления была рассмотрена функциональная схема данного устройства с основным оборудованием и технологическими потоками теплоносителя. Разработана методика моделирования объектов данного класса как объектов с распределёнными параметрами. Рассмотрение процессов, протекающих в ка-

налах нагревательных плит, позволило составить дифференциальные уравнения движения, описывающие течение рабочей среды в системе каналов. Разработанная методика математического моделирования распространения тепла в нагревательных плитах прессы и пакетах фанеры позволила составить математическую модель для рассматриваемого объекта. Данная математическая модель получилась достаточно сложной, и решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным. Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным. Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение. С его помощью были рассчитаны значения температур в контрольных точках. Представленная математическая модель позволила произвести численный эксперимент, в результате которого были получены частотные характеристики исследуемого объекта. Данные характеристики были использованы при синтезе распределенного высокоточного регулятора.

Колонный гидравлический пресс; объекты с распределёнными параметрами; дифференциальные уравнения; моделирование; системный анализ; управление; контроль; диагностика; обработка информации; распределенный регулятор.

A.L. Liashenko

DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM OF THERMAL PROCESSES IN A HYDRAULIC PRESS

The necessity of regulating the temperature of the coolant in hydraulic presses, providing hot gluing of plywood, regulating the pressure in the press channels and maintaining technological parameters at a given level, is considered. A column hydraulic press P-714-B for hot gluing of plywood, installed at the Ust-Izhora plywood mill, is considered as a control object. The article provides a description of the column hydraulic press. To monitor the parameters of the presented installation of plywood production, it is proposed to consider the heating press plates and plywood packages as an object with distributed parameters. To develop a mathematical model of the control object, a functional diagram of this device with the main equipment and technological flows of the coolant was considered. A technique has been developed for modeling objects of this class as objects with distributed parameters. Consideration of the processes occurring in the channels of the heating plates made it possible to formulate differential equations of motion that describe the flow of the working medium in the system of channels. The developed method of mathematical modeling of heat propagation in the heating plates of the press and plywood packages made it possible to draw up a mathematical model for the object under consideration. This mathematical model turned out to be quite complex, and it is not possible to solve the resulting system of partial differential equations analytically (to isolate the transfer function). For a numerical analysis of the considered control object, a discrete model of equations and a computational algorithm were compiled. In the process of compiling discrete models, the problems of “joining” the boundary conditions were solved, the stability of the computational scheme was ensured, and the steps of discretization with respect to spatial variables were selected. Software was specially developed for computer modeling. With its help, the temperature values at the control points were calculated. The presented mathematical model made it possible to carry out a numerical experiment, as a result of which the frequency characteristics of the object under study were obtained. These characteristics were used in the synthesis of a distributed high-precision controller.

Column hydraulic press; objects with distributed parameters; differential equations; modeling; system analysis; control; diagnostics; data processing; distributed regulator.

Введение. В настоящее время одним из наиболее распространенных материалов является фанера общего назначения, которая применяется в производстве мебели и отделки интерьеров, в радиотехнической промышленности, в судостроении, вагоностроении и автостроении.

Фанеру используют в основном в качестве конструкционного материала, поэтому она должна обладать определенными физико-механическими свойствами, иметь определенную прочность и плоскую прямолинейную поверхность [4]. Главной задачей при конструировании листа фанеры является обеспечение его равнопрочности в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Физико-механические свойства фанеры и других видов клееных материалов зависят от породы и свойств древесины, идущей на их изготовление. Кроме того, на свойства фанеры и другой продукции влияют толщина шпона, вид применяемого клея, режимы склеивания (прессования), и многие другие факторы [5].

Производство фанеры является сложным технологическим процессом, состоящим из нескольких этапов, сопровождающихся термической обработкой материалов. Одним из этапов производства является процесс склеивания листов шпона, собранных в пакет. Существует два способа склеивания фанеры: сухой горячий и сухой холодный [8]. К режимам склеивания предъявляются особые требования.

Выбор режима склеивания зависит от породы выбранной древесины, используемого клея и желаемого качества готового продукта.

Процесс склеивания фанеры протекает при поддержании определенных параметров, таких как, температура в клеевом слое, удельное давление, обеспечивающие контакт листов шпона, между которыми находится клеевой слой и продолжительность склеивания [9].

Поддержание указанных параметров требует наличия автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Постановка задачи. Рассмотрим процесс склеивания фанеры сухим горячим способом. При применении данного способа для отверждения клея необходимо производить нагревание пакетов шпона, которое осуществляется в гидравлических прессах.

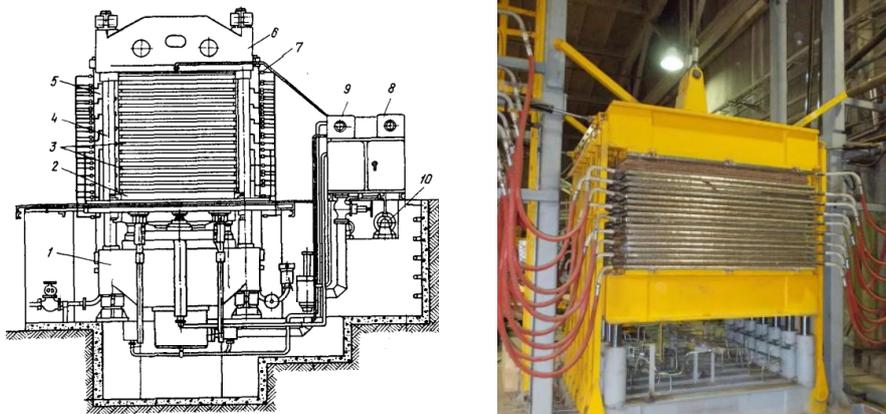


Рис. 1. Колонный гидравлический пресс П-714-Б: 1 – основание; 2 – подвижная траверса; 3 – нагревательные плиты; 4 – колонны; 5, 7 – коллекторы; 6 – неподвижная траверса-архитрав; 8 – манометр; 9 – термометр

Колонный гидравлический пресс П-714-Б (рис. 1) имеет массивное металлическое основание 1. В основании пресса есть отверстия для установки колонн 4, связывающих основание пресса с верхней неподвижной траверсой-архитравом 6. К подвижной траверсе и архитраву прикреплено по одной нагревательной плите, между которыми установлены остальные плиты 3. Чтобы архитрав и стол не нагревались, между ними и плитами есть теплоизолирующие прокладки [10].

Из существующих основных способов нагрева плит – паром, перегретой водой и электричеством – наиболее распространен нагрев паром. Пар подают по трубопроводу к парораспределительному коллектору 5, а оттуда через шарнирные паропроводы в плиты. Пар, отдавая свою теплоту, нагревает плиты пресса и затем, конденсируясь (превращаясь в воду), удаляется через паротводящий коллектор 7 и конденсационный горшок.

Нагревательные плиты обеспечивают в гидравлических прессах горячее склеивание, которое происходит под воздействием давления и температуры.

Температура плит пресса – основной фактор, влияющий на интенсивность прогрева пакета. В гидравлических прессах тепло передают пакету горячие плиты. В прессах с паровым обогревом температура плит зависит от давления пара, обогревающего их [22, 23]. Температуру плит выбирают в зависимости от вида клея, породы древесины, толщины прессуемого пакета

Например, для склеивания трехслойной березовой и ольховой фанеры рекомендуется следующая температура в зависимости от применяемого клея (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемая температура

Клей	Температура, °С
Альбуминовый	140–145
Казеиновый	130–135
Комбинированный	135–140
Карбамидный	125–130
Фенолформальдегидный	140–150
Бакелитовая пленка	145–155

Во время загрузки пакетов и смыкания плит пресса наружные листы шпона и клеевые прослойки, примыкающие к ним, нагреваются вследствие теплоизлучения плит пресса и контакта с плитами. Для предотвращения преждевременного отверждения клеевых прослоек существуют допустимые нормы времени загрузки пакетов в пресс. По достижении удельного давления температура в слоях, удаленных от плит пресса, нарастает медленнее, чем в наружных. Так же неодинаково изменяется температура и по площади пакета. Быстрее температура увеличивается в средней части пакета, медленнее – по его краям.

Конструктивно нагревательные плиты представляют собой плоские массивные стальные листы с расположенной внутри системой каналов, по которым циркулирует теплоноситель. При этом наблюдается перепад температур на входе и выходе теплоносителя из-за большого сопротивления, вызванного относительно большой длиной каналов в результате происходит неравномерный нагрев фанеры по своему объему [8, 22, 23].

Неравномерность распределения температуры внутри пакета позволяет рассматривать его как объект с распределенными параметрами.

Повысить равномерность прогрева позволит применение электрического нагрева плит с помощью помещенных внутри них электроспиралей или специальных трубчатых электронагревателей (ТЭН), управление которыми будет осуществляться с помощью распределенного регулятора.

Разработка математической модели. В работе рассматривается процесс склеивания авиационной фанеры БПС-1В на смоле СФЖ-3011 при рабочем давлении 2–2,5 М Па и температуре плит пресса 148–153 °С.

К числу факторов, определяющих время нагрева, относится толщина пресуемого пакета. В процессе прессования она меняется и тем больше, чем выше внешнее давление. Характер изменения толщины пакета в процессе горячего прессования показан на рис. 2 и подробно рассмотрен в [3].

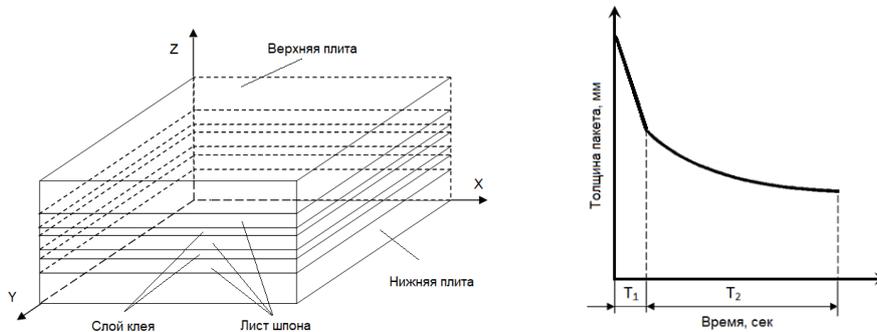


Рис. 2. Схема исследуемого объекта и график изменения толщины пакета при прессовании

На рис. 2 приняты следующие обозначения: T_1 – время наложения давления; T_2 – время термообработки под давлением.

В период T_1 наложения давления пакет изменяет свою толщину. Степень сжатия пакета и уплотнения древесины тем больше, чем больше внешнее давление. В последующий период прессования T_2 начинается прогрев древесины, уменьшается ее сопротивление сжатию, в силу чего при том же давлении древесина продолжает уплотняться, а пакет уменьшать свою толщину

С учетом сформулированных допущений и ограничений была разработана математическая модель тепловых процессов в листе фанеры при интенсивном тепловом воздействии [1, 13, 15, 21]. Ниже представлен фрагмент математической модели для трехслойного пакета фанеры.

Дифференциальное уравнение, записанное для нижней плиты прессы:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{II} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где a_{II} – коэффициент температуропроводности листа шпона.

Дифференциальное уравнение, записанное для нижнего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{III} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (2)$$

где a_{III} – коэффициент температуропроводности листа шпона;

W – мощность внутренних источников энергии;

V – объём, занимаемый листом;

λ – коэффициент теплопроводности.

Дифференциальное уравнение, записанное для клеевого слоя:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_K \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{b W}{\lambda V}. \quad (3)$$

где a_K – коэффициент температуропроводности клея.

Дифференциальное уравнение, записанное для среднего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{III} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для клеевого слоя:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_K \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{b W}{\lambda V}. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для верхнего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{III} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для верхней плиты пресса:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{II} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right]. \quad (7)$$

Далее запишем уравнения движения, описывающие течение однофазной рабочей среды в трубках нагревательных плит [6, 19]. Условия баланса массы, энергии и количества движения для однофазного течения в трубках парогенератора в результате преобразований можно приближенно записать в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = q'_d; \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{M^2}{\rho} = 0, \quad (10)$$

где $M(z, t) = \rho w$ – массовый расход (w – скорость движения жидкости);

$\rho(z, t) = \rho(p, h)$ – плотность жидкости;

$h(z, t)$ – энтальпия жидкости;

$p(z, t)$ – давление;

$q'_d = \pi d \alpha (\Theta_{in} - \vartheta)$ – внутренний тепловой поток на единицу длины трубки (d – внутренний диаметр трубки; $\alpha(p, h, M, q)$ – коэффициент теплообмена; q – тепловой поток на единицу длины трубки; Θ_{in} – температура внутренней поверхности стенки трубки; Θ – температура рабочей среды; $\vartheta(p, h)$ – температура жидкости);

g – ускорение свободного падения;

β – угол между трубкой парогенератора и вертикалью;

f – коэффициент потери давления.

При разработке модели были учтены особенности изделия [3, 10] и заданы условия однозначности [2].

Для решения математической модели применялись численные методы [7, 16, 20], а также было разработано специальное программное обеспечение [14].

По результатам моделирования были построены графики переходных процессов в контрольных точках. На рис. 3 представлен график распределения теплового поля в среднем листе шпона.

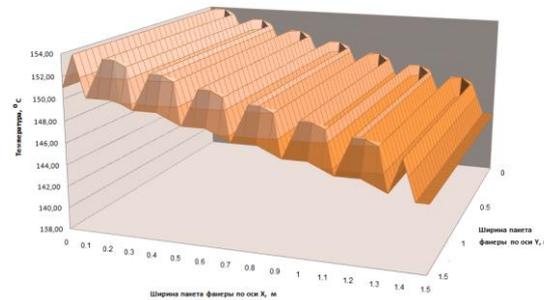


Рис. 3. График распределения теплового поля в среднем листе шпона

Как было отмечено выше и как показали результаты моделирования, объект характеризуется неравномерностью распределения температуры по объему и, следовательно, для управления технологическим процессом разработаем систему с распределенными параметрами [11, 17, 18].

Расчет настроек распределенного регулятора. Для реализации управления был выбран распределенный регулятор [17]. Передаточная функция рассчитываемого распределенного регулятора, имеет вид:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p. \quad (11)$$

Исследуемый объект не принадлежит к классу пространственно-инвариантных, т.е. решение не распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта. Из этого следует, что определение границ расположения годографов собственных значений, может быть осуществлено с использованием спектров Гершгорина.

Исследуем распределенный объект управления, матрица передаточных коэффициентов которого имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} & \dots & a_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}, \text{ где } a_{ij} = \frac{k_{ij}}{T_{ij}p + I} \cdot e^{-p\tau_{ij}},$$

Подавая на каждый вход объекта поочередно постоянный сигнал, на всех выходах получаем графики переходных процессов, из которых определяем k_{ij} , T_{ij} , τ_{ij} .

$$W = \begin{pmatrix} \frac{0,2875}{372p+1}e^{-p \cdot 19} & \frac{0,02376}{2760p+1}e^{-p \cdot 443} & \frac{0,0128}{2330p+1}e^{-p \cdot 124} & \dots & \frac{0,0751}{3204p+1}e^{-p \cdot 950} \\ \frac{0,01242}{2720p+1}e^{-p \cdot 273} & \frac{0,2827}{217p+1}e^{-p \cdot 12} & \frac{0,06424}{2806p+1}e^{-p \cdot 845} & \dots & \frac{0,0263}{2026p+1}e^{-p \cdot 278} \\ \frac{0,0312}{2330p+1}e^{-p \cdot 180} & \frac{0,0372}{2408p+1}e^{-p \cdot 824} & \frac{0,0677}{860p+1}e^{-p \cdot 43} & \dots & \frac{0,0334}{2750p+1}e^{-p \cdot 621} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{0,0736}{3550p+1}e^{-p \cdot 681} & \frac{0,0252}{2957p+1}e^{-p \cdot 424} & \frac{0,01866}{2590p+1}e^{-p \cdot 528} & \dots & \frac{0,3453}{275p+1}e^{-p \cdot 17} \end{pmatrix}$$

Затем определяем модуль и фазу для каждой составляющей матрицы строим спектры Гершгорина (рис. 4).

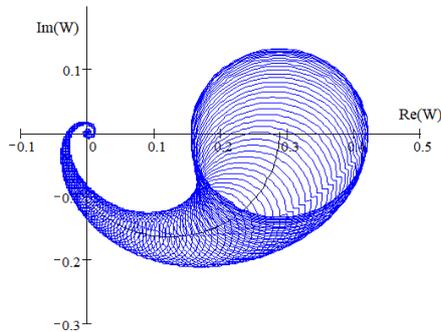


Рис. 4. Спектры Гершгорина по 2-ой секции объекта

Далее, с использованием полученных данных построим частотные характеристики объекта, с помощью которых производим расчет настроек распределенного регулятора.

Запишем передаточную функцию полученного регулятора:

$$W(x, y, p) = 10.51175 \cdot \left[\frac{70.38632 - 1}{70.38632} - \frac{1}{70.38632} \nabla^2 \right] + \quad (12)$$

$$+ 0.012761 \cdot \left[\frac{320.11007 - 1}{320.11007} - \frac{1}{320.11007} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + 155.95792 [1 - 0 \cdot \nabla^2] \cdot p$$

Далее был произведен анализ работы замкнутой системы управления.

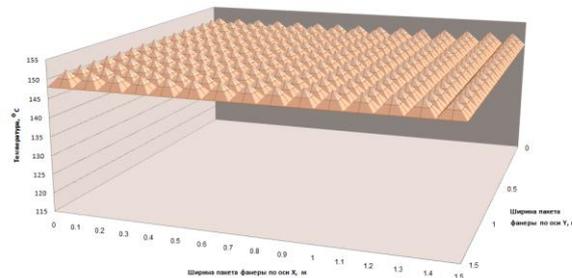


Рис. 5. График распределения теплового поля в среднем листе шпона

Применение распределенного регулятора позволило получить равномерное распределение теплового поля по всему объему пакета, что повышает качество готового продукта.

Выводы. В данной работе был рассмотрен вопрос автоматизации процесса склеивания фанеры. В полном объеме были решены задачи, сформулированные для достижения поставленной цели.

Полученная математическая модель позволяет с высокой точностью производить расчет времени, которое необходимо для прогрева пакета до заданной температуры в соответствии с технологическими требованиями, а рассчитанный распределенный регулятор повышает точность регулирования, что в свою очередь повысит качество фанеры.

Полученная модель может быть использована для проведения дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Александров Н.Л.* Лекции по теории устойчивости гидродинамических и тепловых процессов: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: МФТИ, 2000. – 97 с.
2. *Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М.* Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980. – 383 с.
3. *Васечкин Ю.В.* Технология и оборудование для производства фанеры. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1983. – 310 с.
4. *Волков А.В. [и др.]*. Справочник фанерщика. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 486 с.
5. *Волынский В.Н.* Технология клееных материалов: учеб. пособие для вузов. – Архангельск: Изд-во Архангельского государственного технического университета, 2003. – 280 с.
6. *Имаев Д.Х., Станиславски В.* Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
7. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978.
8. *Кириллов А.Н., Карасев Е.И.* Технология фанерного производства. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1974. – 307 с.
9. *Кондратьев В.П., Кондрашенко В.И., Шредер В.Е.* Синтетические клеи в деревообработке. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 411 с.
10. *Кириллов А.Н., Карасев Е.И.* Технология фанерного производства. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1974. – 312 с.
11. *Ляшенко А.Л.* Синтез распределенной системы управления тепловыми полями в парогенераторных установках // Сб. трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 131-138.
12. *Ляшенко А.Л.* Математическая модель тепловых процессов парового котла теплоэлектростанции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (199). – С. 100-110.
13. *Ляшенко А.Л., Ильюшин Ю.В., Кучеренко И.А., Новожилов И.М.* Решение задачи моделирования поведения температурного поля в распределенных объектах управления // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – № 7. – С. 48-51.
14. *Ляшенко А.Л.* Разработка программного обеспечения для моделирования тепловых полей в объектах с распределенными параметрами // Тр. XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. Ч. II. – СПб.: СЗТУ, 2011. – С. 55-63.
15. *Ляшенко А.Л., Золотов О.И.* Математическое моделирование распределённого объекта управления с подвижным источником воздействия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2011. – № 1 (115). – С. 113-117.
16. *Мельников А.А.* Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов: учеб. пособие. – М.: Моск. ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 2001. – 75 с.
17. *Першин И.М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. – 244 с.
18. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
19. *Станиславски В., Имаев Д.Х.* Динамические модели прямоточных парогенераторов как объектов управления иерархической структуры // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России» (27-28 июня 2002). – СПб.: СПбГТУ, 2002. – С. 203-213.
20. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977.
21. *Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.* Теплообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
22. *Чубов А.Б., Соколова Е.Г.* Основы теории и процесса склеивания древесины: учеб. пособие. – СПб.: СПбГЛТУ, 2014. – 66 с.
23. *Чубинский А.Н.* Технология фанеры: учеб. пособие. – СПб.: СПбГЛТУ 2019. – 81 с.

REFERENCES

1. *Aleksandrov N.L.* Lektsii po teorii ustoychivosti gidrodinamicheskikh i teplovykh protsessov: ucheb. posobie dlya studentov vuzov [Lectures on the theory of stability of hydrodynamic and thermal processes: Textbook for university students]. Moscow: MFTI, 2000, 97 p.
2. *Butkovskiy A.G., Pustyl'nikov L.M.* Teoriya podvizhnogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [The theory of mobile control of systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka, 1980, 383 p.
3. *Vasechkin Yu.V.* Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva fanery [Technology and equipment for the production of plywood]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1983, 310 p.
4. *Volkov A.V. [i dr.]*. Spravochnik fanershchika [Plywood manufacturer's guide]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2010, 486 p.
5. *Volynskiy V.N.* Tekhnologiya kleenykh materialov: ucheb. posobie dlya vuzov [Technology of glued materials: textbook for universities]. Arkhangel'sk: Izd-vo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2003, 280 p.
6. *Imaev D.Kh., Stanislavski V.* Issledovanie dinamiki ierarkhicheskikh sistem na primere parogeneratorov [Research of the dynamics of hierarchical systems on the example of steam generators]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2011 6 220 з.
7. *Kalitin N.N.* Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1978.
8. *Kirillov A.N., Karasev E.I.* Tekhnologiya fanernogo proizvodstva [Technology of plywood production]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1974, 307 p.
9. *Kondrat'ev V.P., Kondrashenko V.I., Shreder V.E.* Sinteticheskie klei v derevoobrabotke [Synthetic adhesives in woodworking]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2013, 411 p.
10. *Kirillov A.N., Karasev E.I.* Tekhnologiya fanernogo proizvodstva [Technology of plywood production]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1974, 312 p.
11. *Lyashenko A.L.* Sintez raspredelennoy sistemy upravleniya teplovymi polyami v parogeneratornykh ustanovkakh [Synthesis of a distributed control system for thermal fields in steam generating plants], *Sb. trudov 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika» (SSPS-2015)* [Proceedings of the 7th All-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics" (SSPS-2015)]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 131-138.
12. *Lyashenko A.L.* Matematicheskaya model' teplovykh protsessov parovogo kotla teploelektrostantsii [Mathematical model of thermal processes of a steam boiler at a thermal power plant], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskyye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (199), pp. 100-110.
13. *Lyashenko A.L., Ilyushin Yu.V., Kucherenko I.A., Novozhilov I.M.* Reshenie zadachi modelirovaniya povedeniya temperaturnogo polya v raspredelennykh ob"ektakh upravleniya [Solving the problem of modeling the behavior of the temperature field in distributed control objects], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestia ETU "LETI"], 2014, No. 7, pp. 48-51.
14. *Lyashenko A.L.* Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya modelirovaniya teplovykh poley v ob"ektakh s raspredelennymi parametrami [Development of software for modeling thermal fields in objects with distributed parameters], *Tr. XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i aspirantov «Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya. Ch. II* [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students and Postgraduates "Analysis and Forecasting of Control Systems. Part II]. Saint Petersburg: SZTU, 2011, pp. 55-63.
15. *Lyashenko A.L., Zolotov O.I.* Matematicheskoe modelirovanie raspredelennoy ob"ekta upravleniya s podvizhnym istochnikom vozdeystviya [Mathematical modeling of a distributed control object with a moving source of influence], *Nauchno-tehnicheskyye vedomosti SPbGPU. Seriya «Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie»* [Scientific and technical statements of SPbSPU. Series "Informatics. Telecommunications. Management "], 2011, No. 1 (115), pp. 113-117.
16. *Mel'nikov A.A.* Raschet elektromagnitnykh i temperaturnykh poley metodom konechnykh elementov: ucheb. posobie [Calculation of electromagnetic and temperature fields by the finite element method: textbook]. Moscow: Mosk. in-t radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki, 2001, 75 p.

17. *Pershin I.M.* Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Pyatigorsk: Reklamno-informatsionnoe agentstvo na KMV, 2007, 244 p.
18. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie ob"ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 299 p.
19. *Stanislavski V., Imaev D.Kh.* Dinamicheskie modeli pryamotochnykh parogeneratorov kak ob"ektov upravleniya ierarkhicheskoy struktury [Dynamic models of direct-flow steam generators as control objects of hierarchical structure], *Tr. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitiya elektroenergetiki Rossii" (27-28 iyunya 2002)* [Proceedings of the International. Scientific and practical conference "Theoretical and practical problems of the development of the Russian electric power industry" (June 27-28, 2002)]. Saint Petersburg: SPbGTU, 2002, pp. 203-213.
20. *Tikhonov A.N., Samarskiy A.A.* Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1977.
21. *Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A.* Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow: Izd-vo MEI, 2005, 550 p.
22. *Chubov A.B., Sokolova E.G.* Osnovy teorii i protsessa skleivaniya drevesiny: ucheb. posobie [Fundamentals of the theory and process of gluing wood: textbook]. Saint Petersburg: SPbGLTU, 2014, 66 p.
23. *Chubinskiy A.N.* Tekhnologiya fanery: ucheb. posobie [Plywood technology: textbook]. Saint Petersburg: SPbGLTU 2019, 81 p.

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

Ляшенко Александр Леонидович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79111049232; кафедра управления в технических системах; доцент.

Liashenko Alexander Leonidovich – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79111049232; the department of control in technical systems; associate professor.

УДК 519.6

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-93-105

Н.Н. Грачева, В.Н. Литвинов, А.В. Никитина, Н.Б. Руденко, А.Е. Чистяков
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ СЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ
НА ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

Для прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) и необратимых последствий деятельности человека ученые широко применяется математическое моделирование. При возникновении ЧС очень важно минимизировать время принятия решения. Разработка проекта решения может основываться на прогнозе изменения моделируемого процесса. При численном решении задач гидрофизики и биологической кинетики возникает необходимость в разработке эффективных методов решения систем сеточных уравнений большой размерности с несамосопряженным оператором. Большой объем обрабатываемой информации и сложность вычислений приводят к необходимости использования вычислительных кластеров, в состав которых добавляются видеоадаптеры для увеличения производительности вычислительной системы и скорости обработки информации. Целью исследования является разработка программного модуля, реализующего алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом (МПТМ) (самосопряженный и несамосопряженный случаи) с использованием технологии NVIDIA CUDA. Описан способ декомпозиции расчетной области в трехмерном случае. Предложена графовая модель организации параллельного конвейерного вычислительного процесса, ориентированная на графический ускоритель GPU

(Graphics Processing Unit). Для двух видеоадаптеров с различными характеристиками были проведены экспериментальные исследования для определения оптимальной двумерной конфигурации потоков в вычислительном блоке, реализуемом на одном потоковом мультипроцессоре, при которой время реализации на GPU одного шага МПТМ является минимальным. Проведенные исследования показали, что выбор способа декомпозиции расчетной области в виде параллелепипедов необходимо выполнять с учетом архитектуры видеоадаптера. Разработанные алгоритм и программный модуль позволяют более эффективно задействовать вычислительные ресурсы GPU, используемой для решения вычислительно-трудоемких задач гидрофизики.

Математическое моделирование; параллельный алгоритм; графический ускоритель.

N.N. Gracheva, V.N. Litvinov, A.V. Nikitina, N.B. Rudenko, A.E. Chistyakov

COMPUTATIONAL ASPECTS OF SOLVING GRID EQUATIONS ON GRAPHICS ACCELERATORS

To predict emergencies and irreversible consequences of human activities, scientists use mathematical modeling. When an emergency occurs, it is very important to minimize the decision-making time. The development of the project solution can be based on the forecast of changes in the modeled process. In the numerical solution of problems of hydrophysics and biological kinetics, it becomes necessary to develop effective methods for solving systemic equations of large dimension with a non-self-adjoint operator. The large volume of processed information and the complexity of computations necessitate the use of computational clusters, which include video adapters to increase the performance of the computing system and the speed of information processing. The aim of the research is to develop a solution for a module that implements the algorithm of the system of linear algebraic equations (SLAE) by the modified alternative triangular iterative method (MATM) (self-adjoint and non-self-adjoint case) using NVIDIA CUDA technology. A method for decomposition of the computational domain in a three-dimensional case is described. A graph model of a parallel pipeline computational process is proposed, focused on the GPU (Graphics Processing Unit). To determine the two-dimensional configuration of flows in the computational unit, when performing one step of one step, the MATM is minimal. The studies have shown that the choice of the method of decomposition of the computational domain in the form of parallelepipeds must be performed taking into account the architecture of the video adapter. The developed algorithm and software module make it possible to more effectively use the computational resources of the GPU used to solve computationally laborious problems of hydrophysics.

Mathematical modeling; parallel algorithm; graphics accelerator.

Введение. Прогнозирование экологических рисков позволяет снизить ущерб от неблагоприятных и чрезвычайных ситуаций в природе, в частности в прибрежной зоне водоемов. Исследования в этой области требуют построения математических моделей и изучения влияния различных факторов на объект исследования.

В настоящее время большую актуальность приобретает компьютерное моделирование, которое заменяет собой сложные системы и физические модели, а так же позволяет прогнозировать различные явления и процессы, происходящие в природе. В основе компьютерного моделирования, как правило, лежат математические модели, дискретизация которых приводит к СЛАУ большой размерности с самосопряженным и несамосопряженным операторами. Для решения таких систем сеточных уравнений требуются большие вычислительные мощности.

Исследованием и прогнозированием водных экосистем занимаются многие российские и зарубежные учёные. Ученые Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН [1, 2], Института прикладной математики им. М.В. Келдыша [3, 4] занимаются анализом и моделированием сложных систем (в экологии, окружающей среде и т.д.), моделированием гидродинамических процессов, прогнозированием климатических изменений мирового океана. Под руководством Матишова Г.Г. проводятся работы по моделированию гидрофизических процессов

на примере Азовского моря [5]. В работах Bonaduce A., Staneva J. описаны математические модели динамики уровней морей [6]. Совершенствованием океанических моделей занимаются ученые Marchesiello P., Androsov A. и др. [7, 8]. Существующие стандартные программные комплексы зачастую включают упрощенные математические модели, не учитывающие пространственно-неоднородное движение водной среды, имеют недостаточную точность моделирования вихревых структур течений водного потока, рельефов берега и дна [9]. Актуальным направлением совершенствования программных комплексов является разработка параллельных алгоритмов, исполняемых как на CPU (Central Processing Unit), так и на GPU (Graphics Processing Unit) [10]. Ученые Weicheng Xue и Christopher J. Roy занимаются исследованиями, связанными с оптимизацией производительности вычислений при решении задач гидродинамики на нескольких графических процессорах, улучшением производительности мульти-GPU на структурированных сетках. В своих работах они показывают, что использование графических процессоров улучшает производительность в 30-70 раз [11, 12]. Исследователи Taku Nagatake и Tomoaki Kunugi анализировали возможность применения GPU для ускорения вычисления многофазных потоков. Ими было установлено, что время вычислений на графическом процессоре (одиночном GTX280) было примерно в 4 раза быстрее, чем время вычислений на центральном процессоре (Xeon 5040, 4 распараллеленных потока) [13]. David J. Munk и Timoleon Kirougos в своих работах описывают ускорение процесса оптимизации мультифизической топологии на GPU-архитектуре [14].

Целью исследования является разработка алгоритмов, позволяющих решить СЛАУ большой размерности за ограниченное время, и их программная реализация в среде гетерогенных вычислительных систем.

1. Метод решения сеточных уравнений. Пусть A – линейный положительно определенный оператор ($A > 0$), и в конечномерном Гильбертовом пространстве H необходимо решить операторное уравнение

$$Ax = f, A: H \rightarrow H. \quad (1)$$

Для сеточного уравнения (1) используются итерационные методы, которые в канонической форме могут быть представлены уравнением [15–18]

$$B \frac{x^{m+1} - x^m}{\tau_{m+1}} + Ax^m = f, B: H \rightarrow H, \quad (2)$$

где m – номер итерации, $\tau_{m+1} > 0$ – параметр итерации, B – предобуславливатель. Оператор B строится исходя из аддитивного представления оператора A_0 – симметричной части оператора A

$$A_0 = R_1 + R_2, \quad R_1 = R_2^*, \quad (3)$$

где $A = A_0 + A_1$, $A_0 = A_0^*$, $A_1 = -A_1^*$.

Предобуславливатель формируется следующим образом

$$B = (D + \omega R_1) D^{-1} (D + \omega R_2), \quad D = D^* > 0, \quad \omega > 0, \quad (4)$$

где D – диагональный оператор, R_1, R_2 являются нижними и верхними треугольными операторами соответственно.

Алгоритм вычисления сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным методом вариационного типа записывается в следующем виде

$$\begin{aligned}
r^m &= Ax^m - f, \quad B(\omega_m)w^m = r^m, \quad \tilde{\omega}_m = \sqrt{\frac{(Dw^m, w^m)}{(D^{-1}R_2w^m, R_2w^m)}}, \\
s_m^2 &= 1 - \frac{(A_0w^m, w^m)^2}{(B^{-1}A_0w^m, A_0w^m)(Bw^m, w^m)}, \quad k_m^2 = \frac{(B^{-1}A_1w^m, A_1w^m)}{(B^{-1}A_0w^m, A_0w^m)}, \\
\theta_m &= \frac{1 - \sqrt{\frac{s_m^2 k_m^2}{(1+k_m^2)}}}{1+k_m^2(1-s_m^2)}, \quad \tau_{m+1} = \theta_m \frac{(A_0w^m, w^m)}{(B^{-1}A_0w^m, A_0w^m)}, \quad x^{m+1} = x^m - \tau_{m+1}w^m, \quad \omega_{m+1} = \tilde{\omega}_m,
\end{aligned} \tag{5}$$

где r^m – вектор невязки, w^m – вектор коррекции, s_m – параметр, описывающий скорость сходимости метода, k_m – описывает отношение нормы кососимметричной части оператора к норме симметричной части.

2. Программная реализация метода решений сеточных уравнений. Решение сеточных уравнений с помощью МПТМ (модифицированного попеременно-треугольного итерационного метода) предполагает использование трёхмерной равномерной расчетной сетки [19]

$$\begin{aligned}
\bar{w}_h &= \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z; n = \overline{0, n_1 - 1}, i = \overline{0, n_1 - 1}, \\
& j = \overline{0, n_2 - 1}, k = \overline{0, n_3 - 1}; (n_1 - 1)\tau = T, (n_1 - 1)h_x = l_x, (n_2 - 1)h_y = l_y, (n_3 - 1)h_z = l_z\},
\end{aligned}$$

где τ – шаг по времени, h_x, h_y, h_z – пространственные шаги, n_1 – количество временных слоев, T – верхняя граница по временной координате, n_1, n_2, n_3 – количество узлов по пространственным координатам, l_x, l_y, l_z – пространственные размеры прямоугольного параллелепипеда, в который вписана расчетная область.

При дискретизации моделей математической физики, в частности гидродинамики, получим систему сеточных уравнений. Каждое уравнение системы может быть представлено в канонической форме, при этом будем использовать семиточечный шаблон (рис. 1):

$$c(m_0)u(m_0) - \sum_{i=1}^6 c(m_0, m_i)u(m_i) = F(m_0),$$

где $m_0(x_i, y_j, z_k)$ – центр шаблона, $M'(P) = \{m_1(x_{i+1}, y_j, z_k), m_2(x_{i-1}, y_j, z_k), m_3(x_i, y_{j+1}, z_k), m_4(x_i, y_{j-1}, z_k), m_5(x_i, y_j, z_{k+1}), m_6(x_i, y_j, z_{k-1})\}$ – окрестность центра, $c_0 \equiv c(m_0)$ – коэффициент центра шаблона, $c_i \equiv c(m_0, m_i)$ – коэффициенты окрестности центра шаблона, F – вектор правых частей, u – рассчитываемый вектор.

В разработанном программном модуле использованы одномерные массивы. Переход от трехмерного представления узла сетки (i, j, k) к одномерной записи (номеру узла) осуществляется по следующей формуле:

$$m_0 = i + jn_1 + kn_1n_2.$$

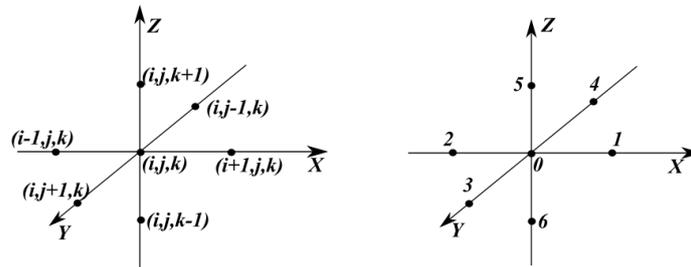


Рис. 1. Сеточный шаблон для решения уравнений гидродинамики

Номера узлов, стоящих в окрестности центра шаблона $m_i, i = \overline{1, 6}$, рассчитываются по формулам:

$$m_1 = m_0 + 1, \quad m_2 = m_0 - 1, \quad m_3 = m_0 + n_1, \\ m_4 = m_0 - n_1, \quad m_5 = m_0 + n_1 n_2, \quad m_6 = m_0 - n_1 n_2.$$

Алгоритм МПТМ состоит из четырёх этапов:

- ◆ вычисление значений вектора невязки r^m и его равномерной нормы;
- ◆ расчет вектора поправки w^m ;
- ◆ нахождение скалярных произведений и расчет на их основе итерационных параметров τ_{m+1}, ω_{m+1} ;
- ◆ переход на следующий итерационный слой.

Итерационный процесс продолжается пока норма вектора невязки r^m не достигнет заданной точности.

Наиболее трудоемкой частью алгоритма является расчет вектора поправки из уравнения:

$$(D + \omega R_1) D^{-1} (D + \omega R_2) w^m = r^m.$$

Решение данной задачи сводится к решению двух СЛАУ с нижнетреугольной и верхнетреугольной матрицами:

$$(D + \omega R_1) y^m = r^m, \quad (D + \omega R_2) w^m = D y^m.$$

Расчет вектора невязки осуществляется за $14N$ арифметических действий. Трудоемкость расчета значений вектора поправки составляет $19N$ арифметических операций (по $9N$ и $10N$ для решения СЛАУ верхнетреугольного и нижнетреугольного видов соответственно). Переход на следующую итерацию потребует еще $2N$ арифметических действий. Итого, общее число арифметических действий, необходимое для решения СЛАУ с семидиагональной матрицей с помощью МПТМ в случае известных итерационных параметров τ_{m+1}, ω_{m+1} , равно $35N$.

Определим трудоемкость адаптивной оптимизации МПТМ минимальных поправок. Вычисление векторов $A_0 w^m$, $A_1 w^m$ и $R_2 w^m$ требует по $13N$, $11N$ и $7N$ операций. Умножение векторов на диагональные операторы D^{-1} и D потребует по N операций. Обращение B для нахождения векторов $B^{-1} A_0 w^m$ и $B^{-1} A_1 w^m$ потребует по $19N$ операций. Также необходимо вычислить 6 скалярных произведений, каждое из которых потребует еще по $2N$ операций. Таким образом, каждая адаптивная оп-

тимизации МПТМ минимальных поправок требует $83N$ арифметических операций в несамосопряженном случае и $49N$ в самосопряженном. Процесс расчета итерационных параметров τ_{m+1}, ω_{m+1} является трудоемким, но при решении сеточных уравнений в адаптивном случае достаточно быстро наблюдается его установление. Вследствие чего данные параметры не требуется вычислять на каждой итерации.

3. Параллельная реализация. Численная реализация МПТМ для решения СЛАУ высокой размерности основана на разработанных параллельных алгоритмах, реализующих конвейерный процесс вычислений. Использование данных алгоритмов позволяет полностью задействовать все доступные вычислительные ресурсы, включая высокопроизводительные графические ускорители. Предполагается, что каждый вычислительный узел системы может содержать от 1 до 2 центральных процессоров (CPU), содержащих от 1 до 32 ядер, и от 1 до 12 видеоускорителей NVIDIA с поддержкой технологии CUDA (GPU), обладающих от 192 (NVIDIA GeForce GT 710) до 5120 (NVIDIA Tesla V100) ядер CUDA. Обмен данными между узлами осуществляется с помощью технологии MPI (Message Passing Interface). Организацию вычислений на каждом узле выполняет алгоритм, управляющий всеми доступными потоками CPU и GPU (вычислителями). Каждый вычислитель выполняет расчеты только для своего фрагмента расчетной области. Для этого расчетная область разбивается на подобласти, назначаемые отдельным вычислительным узлам. Далее каждая подобласть разбивается на фрагменты, назначаемые каждому ядру CPU и каждому вычислительному блоку GPU.

Разбиение подобласти на фрагменты, сопоставляемые с каждым вычислителем внутри отдельного вычислительного узла, выполняется следующим образом: количество фрагментов расчетной области по оси Oz выбирается как наименьшее общее кратное оптимальных размерностей вычислительных блоков CUDA для всех задействованных в кластере видеоускорителей. Количество фрагментов расчетной области по оси Ox в блоке (Nx) выбирается таким образом, чтобы их количество было больше количества вычислителей в кластере и они были одинаковыми. Количество фрагментов расчетной области по оси Oy в блоке выбирается так, чтобы время расчета каждого блока разными вычислителями было примерно одинаковое. Для этого предварительно выполняется серия экспериментов по расчету производительности вычислителей, представляющей собой 95-й процентиль времени расчета в пересчете на 1000 узлов расчетной сетки.

Для описания связей между смежными фрагментами расчетной сетки и организации процесса конвейерного вычисления использовалась графовая модель (рис. 2). Каждый узел графа представляет собой объект класса, описывающего фрагмент расчетной области. Данный класс содержит следующие поля: размерности фрагмента по осям Ox , Oy и Oz ; индекс нулевого узла фрагмента в глобальной расчетной области, указатели на смежные фрагменты расчетной сетки, а также указатели на объекты, описывающие параметры вычислителей. Вычислительный процесс представляет собой обход графа от корневого узла с параллельным запуском вычислителей, обрабатывающих узлы графа, в соответствии со значением счетчика этапов вычислений $s = k \cdot i + j$.

Для повышения эффективности расчетов фрагментов расчетной сетки, закреплённых за графическими ускорителями, разработан алгоритм и его программная реализация на языке CUDA C [20, 21].

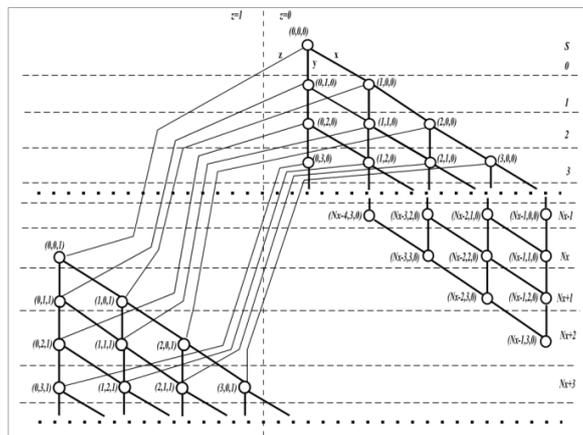


Рис. 2. Графовая модель, описывающая связи между смежными фрагментами расчетной сетки и процесс конвейерного вычисления

Приведем алгоритм поиска решения системы уравнений с нижнетреугольной матрицей (прямой ход) на CUDA C (рис. 3).

Algorithm 1 ptmKernel3(IN: $c_0, c_2, c_4, c_6, \omega$ IN/OUT: r ;)

```

1: threadX  $\leftarrow$  blockDim.x  $\cdot$  blockDim.x + threadIdx.x;
2: threadZ  $\leftarrow$  blockDim.z  $\cdot$  blockDim.z + threadIdx.z;
3: i  $\leftarrow$  threadX + 1;
4: j  $\leftarrow$  1;
5: k  $\leftarrow$  threadZ + 1;
6: for s  $\in$  [3; n1 + n2 + n3 - 3] do
7:   if (i + j + k = s)  $\wedge$  (s < i + n2 + k) then
8:     m0  $\leftarrow$  i + (blockDim.x + 1)  $\cdot$  j + n1  $\cdot$  n2  $\cdot$  k;
9:     if c0[m0] > 0 then
10:      m2  $\leftarrow$  m0 - 1;
11:      m4  $\leftarrow$  m0 - n1;
12:      m6  $\leftarrow$  m0 - n1  $\cdot$  n2;
13:      rm4  $\leftarrow$  0;
14:      if (s > 3 + threadX + threadZ) then
15:        rm4  $\leftarrow$  cache[threadX][threadZ];
16:      else
17:        rm4  $\leftarrow$  r[m4];
18:      rm2  $\leftarrow$  0;
19:      if (threadX  $\neq$  0)  $\wedge$  (s > 3 + threadX + threadZ) then
20:        rm2  $\leftarrow$  cache[threadX - 1][threadZ];
21:      else
22:        rm2  $\leftarrow$  r[m2];
23:      rm6  $\leftarrow$  0;
24:      if (threadZ  $\neq$  0)  $\wedge$  (s > 3 + threadX + threadZ) then
25:        rm6  $\leftarrow$  cache[threadX][threadZ - 1];
26:      else
27:        rm6  $\leftarrow$  r[m6];
28:      rm0  $\leftarrow$  ( $\omega \cdot$  (c2[m0]  $\cdot$  rm2 + c4[m0]  $\cdot$  rm4 + c6[m0]  $\cdot$  rm6) + r[m0]) / ((0.5  $\cdot$   $\omega$  + 1)  $\cdot$  c0[m0]);
29:      cache[threadX][threadZ]  $\leftarrow$  rm0;
30:      r[m0]  $\leftarrow$  rm0;
31:      j  $\leftarrow$  j + 1;
```

Рис. 3. Алгоритм поиска решения системы уравнений с нижнетреугольной матрицей

Входными параметрами алгоритма являются векторы коэффициентов сеточных уравнений C_0, C_2, C_4, C_6 и константа ω . Выходной параметр – вектор скорости водного потока r . Перед запуском алгоритма необходимо программно задать размерности вычислительного блока CUDA $blockDim.x, blockDim.z$ по про-

пространственным координатам x, z соответственно. Инфраструктура CUDA запускает данный алгоритм для каждой нити, при этом значения переменных $threadIdx.x, threadIdx.z, blockIdx.x, blockIdx.z$ автоматически инициализируются индексами соответствующих нитей и блоков. Глобальные индексы нитей вычисляются в строках 1 и 2.

Индекс строки i и индекс слоя k , которые обрабатывает текущий поток, вычисляются в строках 3 и 5. В строке 4 инициализируется переменная j , представляющая собой счетчик по координате y . Конвейер вычислений организован в виде цикла в строке 6. В строках 8, 10–12 вычисляются индексы центрального узла сеточного шаблона m_0 и окрестных узлов m_2, m_4, m_6 .

Двумерный массив *cache* расположен в разделяемой памяти GPU и предназначен для сохранения результатов вычислений на текущем слое по координате y . Это позволяет уменьшить количество считываний из медленной глобальной памяти и ускорить процесс вычислений на величину до 30 %.

Проведенные исследования показывают существенную зависимость времени реализации алгоритма вычисления преобразователя от соотношения нитей по пространственным координатам.

Коллективом авторов были проведены экспериментальные исследования, в которых использовались два видеоадаптера с различными характеристиками.

Первый видеоадаптер: GeForce MX 250, объём видеопамяти которого составляет 4 Гб, тактовая частота ядра 1518–1582 МГц, тактовая частота памяти 7000 МГц, разрядность шины видеопамяти – 64 бита, число ядер CUDA – 384.

Цель эксперимента – определить распределение потоков по осям Ox и Oz расчетной сетки при фиксированном значении узлов сетки по оси Oy , равным 10000 таким образом, чтобы время реализации на GPU одного шага ПТМ было минимальным.

В качестве факторов были приняты две величины: X – количество потоков по оси Ox , Z – количество потоков по оси Oz . Целевая функция: T_{GPU} – время реализации одного шага МПТМ на GPU, мс. Произведение потоков X и Z не должно превышать 1024. Такое ограничение накладывает CUDA, т.к. 1024 – это количество потоков в одном блоке. Поэтому уровни варьирования факторов X и Z были выбраны так, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ п/п	X	Z	T_{GPU} , мс
	16	64	64
	32	32	65
	64	16	81
	128	8	109
	256	4	100
	512	2	103

В результате анализа экспериментальных данных установлено:

♦ на время реализации одного шага МПТМ на GPU влияет только количество потоков по оси Oz . Время реализации одного шага МПТМ на GPU обратно пропорционально количеству узлов расчетной сетки по оси Oz , т.е. с увеличени-

ем числа узлов по оси Oz время вычисления уменьшается по логарифмическому закону. Поэтому целесообразно выполнять декомпозицию расчетной области в виде параллелепипедов, у которых размер по оси Oz максимален, а по оси Ox минимален;

- ◆ оптимальные значения X и Z , которые составили 16 и 64 соответственно.

Второй видеоадаптер: GeForce GTX 1650 имеет объём видеопамяти 4 Гб, тактовые частоты ядра и памяти 1485 МГц и 8000 МГц соответственно, разрядность шины видеопамяти – 128 бит. Вычислительная часть состоит из 56 текстурных процессорных кластеров (Texture Processor Cluster – TPC) по 2 мультипроцессора (SM) в каждом. Каждый мультипроцессор содержит 8 потоковых процессоров (Streaming Processor – SP) или ядер CUDA. Таким образом, число ядер CUDA для видеоадаптера GeForce GTX 1650 – 896.

Цель эксперимента – определить распределение потоков по осям Ox и Oz расчетной сетки при различных значениях ее узлов по оси Oy так, чтобы время реализации на GPU одного шага МПТМ было минимальным.

В качестве факторов приняты две величины: $k = X/Z$ – отношение количества потоков по оси Ox , (X) к количеству потоков по оси Oz , (Z), Y – количество потоков по оси Oy . Значения целевой функции: T_{GPU} – время реализации одного шага МПТМ на GPU в пересчёте на 1000 узлов расчетной сетки, мс. Произведение потоков X и Z не должно превышать 640 – количества потоков в одном блоке. Поэтому уровни варьирования величин X и Z были выбраны с учетом ограничений CUDA. Так, например, количество потоков по оси Oy варьировалось в диапазоне [1000, 30000].

Анализ экспериментальных данных для значений факторов $X = 1, Z = 640$ и $X = 640, Z = 1$ показал, что при вычислении целевой функции в указанных точках не используется распределяемая память, поэтому при проведении регрессионного анализа эти точки были исключены.

В результате анализа экспериментальных данных установлено:

- ◆ при $k < 10$ и $Y < 1000$ скорость вычислений замедляется, т.к. в этом случае неэффективно используется распределяемая память графического ускорителя;
- ◆ наименьшее время реализации одного шага МПТМ в пересчёте на 1000 узлов расчетной сетки на видеоадаптере GeForce GTX 1650 будет получено при наибольшем количестве потоков по оси Oy и наибольшем значении коэффициента k ;
- ◆ время реализации одного шага МПТМ в пересчёте на 1000 узлов расчетной сетки на видеоадаптере GeForce GTX 1650 обратно пропорционально количеству узлов расчетной сетки по оси Oz , т.е. с увеличением числа узлов по оси Oz время вычисления уменьшается;
- ◆ наибольшее значение коэффициента k достигается при увеличении количества потоков по оси Ox и уменьшении количества потоков по оси Oz . Поэтому целесообразно выполнять декомпозицию расчетной области в виде параллелепипедов, у которых размер по оси Oz минимален, а по оси Ox максимален.

Заключение. В результате проведенных исследований разработаны алгоритм и программный модуль, его реализующий, предназначенные для решения СЛАУ (самосопряженный и несамосопряженный случаи), возникающей при дискретизации задачи гидродинамики мелководного водоема, МПТМ с использованием технологии NVIDIA CUDA. Описан способ декомпозиции расчетной сетки, применимый для гетерогенных вычислительных систем. Предложена графовая модель,

позволяющая организовать параллельный конвейерный вычислительный процесс на GPU, предназначенный для решения систем сеточных уравнений большой размерности.

Для каждого из двух видеоадаптеров с различными характеристиками были проведены экспериментальные исследования для определения оптимальной двумерной конфигурации потоков в вычислительном блоке, реализуемом на одном потоковом мультипроцессоре, при которой время реализации на GPU одного шага МПТМ является минимальным. Проведенные исследования показали, что выбор способа декомпозиции расчетной области в виде параллелепипедов необходимо выполнять с учетом архитектуры видеоадаптера.

Разработанный программный инструментарий позволяет более эффективно задействовать вычислительные ресурсы GPU, используемой для решения вычислительно-трудоемких пространственно-трехмерных задач гидрофизики.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00623.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Vassilevski Y., Terekhov K., Nikitin K., Kapyrin I.* Parallel Finite Volume Computation on General Meshes. – Springer International Publishing, 2020. – 186 p.
2. *Дымников В.П., Тыртышиников Е.Е., Лысков В.Н., Залесный В.Б.* Математическое моделирование климата, динамики атмосферы и океана: К 95-летию Г.И. Марчука и 40-летию ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 251-254.
3. *Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Чететкин В.М., Орлов К.Г., Федотова Е.А., Мингалев В.С., Мингалев О.В.* Модели общей циркуляции атмосферы Земли. Достижения и направления развития // Математическое моделирование. – 2020. – Т. 32, № 11. – С. 29-46.
4. *Головизнин В.М., Четверушкин Б.Н.* Алгоритмы нового поколения в вычислительной гидродинамике // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2018. – Т. 58, № 8. – С. 20-29.
5. *Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л.* Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. – М.: Наука, 2006. – 304 с.
6. *Bonaduce A., Staneva J., Grayek S., Bidlot J.-R., Breivik O.* Sea-state contributions to sea-level variability in the European Seas // Ocean Dynamics. – 2020. – 70 (12). – P. 1547-1569. – DOI: 10.1007/s10236-020-01404-1.
7. *Marchesiello P., McWilliams J.C., Shchepetkin A.* Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models // Oceanic Modelling Journal. – Netherlands: Elsevier BV. – 2001. – Vol. 3, No. 1-2. – P. 1-20. – DOI: 10.1016/s1463-5003(00)00013-5.
8. *Андросов А.А., Вольцингер Н.Е.* Проливы мирового океана. Общий подход к моделированию. – М.: Наука, 2005. – 172 с.
9. *Nieuwstadt F., Westerweel J., Boersma B.J.* Turbulence. Introduction to Theory and Applications of Turbulent Flows. – Springer, 2016. – 288 p.
10. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
11. *Xue W., Roy C.J.* Multi-GPU performance optimization of a computational fluid dynamics code using OpenACC // Concurrency and Computation Practice and Experience. – 2020. – 33 (4). – DOI: 10.1002/cpe.6036.
12. *Xue W., Jackson C.W., Xue W., Roy C.J.* Multi-CPU/GPU Parallelization, Optimization and Machine Learning based autotuning of Structured Grid CFD Codes // AIAA Aerospace Sciences Meeting. – 2018. – P. 0362. – DOI: 10.2514/6.2018-0362.
13. *Nagatake T., Kunugi T.* Application of GPU to Computational Multiphase Fluid Dynamics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 10 (1). – P. 012024. – DOI: 10.1088/1757-899X/10/1/012024.

14. Munk D.J., Kipouros T., Vio G.A. Multi-physics bi-directional evolutionary topology optimization on GPU-architecture // *Engineering with Computers*. – 2019. – Vol. 35 (4). – P. 1059-1079. – DOI: 10.1007/s00366-018-0651-1.
15. Сухинов А.И., Атаян А.М., Белова Ю.В., Литвинов В.Н., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Обработка данных натурных измерений экспедиционных исследований для математического моделирования гидродинамических процессов Азовского моря // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 161-174.
16. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Shishenya A.V., Timofeeva E.F. Predictive Modeling of Coastal Hydrophysical Processes in Multiple-Processor Systems Based on Explicit Schemes // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2018. – 10 (5). – P. 648-658. – DOI: 10.1134/S2070048218050125.
17. Коновалов А.Н. Метод скорейшего спуска с адаптивным попеременнотреугольным переусловливателем // *Дифференциальные уравнения*. – 2004. – Т. 40, № 7. – С. 953-963.
18. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Литвинов В.Н., Никитина А.В., Белова Ю.В., Филина А.А. Вычислительные аспекты математического моделирования гидробиологических процессов в мелководном водоеме // *Вычислительные методы и программирование*. – 2020. – Т. 21, № 4. – С. 452-469. – DOI: <https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r436>.
19. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 248 с.
20. Oyarzun G., Borrell R., Gorobets A., Oliva A. MPI-CUDA sparse matrix-vector multiplication for the conjugate gradient method with an approximate inverse preconditioner // *Computers and Fluids*. – 2014. – Vol. 92. – P. 244-252. – DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.10.035.
21. Zheng Liang, Gerya Taras, Knepley Matthew, Yuen David, Zhang Huai, Shi Yaolin. Implementation of a multigrid solver on a GPU for Stokes equations with strongly variable viscosity based on Matlab and CUDA // *International Journal of High Performance Computing Applications*. – 2014. – 28 (1). – P. 50-60. – DOI: 10.1007/978-3-642-16405-7_21.

REFERENCES

1. Vassilevski Y., Terekhov K., Nikitin K., Kapryin I. *Parallel Finite Volume Computation on General Meshes*. Springer International Publishing, 2020, 186 p.
2. Dymnikov V.P., Tyrtshnikov E.E., Lykosov V.N., Zalesnyy V.B. Matematicheskoe modelirovanie klimata, dinamiki atmosfery i okeana: K 95-letiyu G.I. Marchuka i 40-letiyu IVM RAN [Mathematical modeling of climate, atmospheric and ocean dynamics: To the 95th anniversary of G.I. Marchuk and the 40th anniversary of the IVM RAS], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean], 2020, Vol. 56, No. 3, pp. 251-254.
3. Chetverushkin B.N., Mingalev I.V., Chechetkin V.M., Orlov K.G., Fedotova E.A., Mingalev V.S., Mingalev O.V. Modeli obshchey tsirkulyatsii atmosfery Zemli. Dostizheniya i napravleniya razvitiya [Models of the general circulation of the Earth's atmosphere. Achievements and development goals], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2020, Vol. 32, No. 11, pp. 29-46.
4. Goloviznin V.M., Chetverushkin B.N. Algoritmy novogo pokoleniya v vychislitel'noy gidrodinamike [New generation algorithms in computational fluid dynamics], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2018, Vol. 58, No. 8, pp. 20-29.
5. Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. Zakonomernosti ekosistemnykh protsessov v Azovskom more [Regularities of ecosystem processes in the Sea of Azov]. Moscow: Nauka, 2006, 304 p.
6. Bonaduce A., Staneva J., Grayek S., Bidlot J.-R., Breivik O. Sea-state contributions to sea-level variability in the European Seas, *Ocean Dynamics*, 2020, 70 (12), pp. 1547-1569. DOI: 10.1007/s10236-020-01404-1.
7. Marchesiello P., McWilliams J.C., Shchepetkin A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models, *Oceanic Modelling Journal*. Netherlands: Elsevier BV, 2001, Vol. 3, No. 1-2, pp. 1-20. DOI: 10.1016/s1463-5003(00)00013-5.
8. Androssov A.A., Vol'tsinger N.E. Prolivy mirovogo okeana. Obshchiy podkhod k modelirovaniyu [Straits of the world ocean. General approach to modeling]. Moscow: Nauka, 2005, 172 p.

9. *Nieuwstadt F., Westerweel J., Boersma B.J.* Turbulence. Introduction to Theory and Applications of Turbulent Flows. Springer, 2016, 288 p.
10. *Voevodin V.V., Voevodin V.V.* Parallelnye vychisleniya [Parallel computing]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p.
11. *Xue W., Roy C.J.* Multi-GPU performance optimization of a computational fluid dynamics code using OpenACC, *Concurrency and Computation Practice and Experience*, 2020, 33 (4). DOI: 10.1002/cpe.6036.
12. *Xue W., Jackson C.W., Xue W., Roy C.J.* Multi-CPU/GPU Parallelization, Optimization and Machine Learning based autotuning of Structured Grid CFD Codes, *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018, pp. 0362. DOI: 10.2514/6.2018-0362.
13. *Nagatake T., Kunugi T.* Application of GPU to Computational Multiphase Fluid Dynamics, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2010, Vol. 10 (1), pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/10/1/012024.
14. *Munk D.J., Kipouros T., Vio G.A.* Multi-physics bi-directional evolutionary topology optimization on GPU-architecture, *Engineering with Computers*, 2019, Vol. 35 (4), pp. 1059-1079. DOI: 10.1007/s00366-018-0651-1.
15. *Sukhinov A.I., Atayan A.M., Belova Yu.V., Litvinov V.N., Nikitina A.V., Chistyakov A.E.* Obrabotka dannykh naturnykh izmereniy ekspeditsionnykh issledovaniy dlya matematicheskogo modelirovaniya gidrodinamicheskikh protsessov Azovskogo morya [Processing of data of field measurements of expeditionary research for mathematical modeling of hydrodynamic processes of the Sea of Azov], *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational mechanics of continuous media], 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 161-174.
16. *Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Shishenya A.V., Timofeeva E.F.* Predictive Modeling of Coastal Hydrophysical Processes in Multiple-Processor Systems Based on Explicit Schemes, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, 10 (5), pp. 648-658. DOI: 10.1134/S2070048218050125.
17. *Konovalov A.N.* Metod skoreyshego spuska s adaptivnym poperemennotreugol'nym pereobuslovlivatelyem [The method of rapid descent with an adaptive alternating triangular re-conditionalist], *Differentsial'nye uravneniya* [Differential equations], 2004, Vol. 40, No. 7, pp. 953-963.
18. *Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Litvinov V.N., Nikitina A.V., Belova Yu.V., Filina A.A.* Vychislitel'nye aspekty matematicheskogo modelirovaniya gidrobiologicheskikh protsessov v melkovodnom vodoeme [Computational aspects of mathematical modeling of hydrobiological processes in a shallow reservoir], *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming], 2020, Vol. 21, No. 4, pp. 452-469. DOI: <https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r436>.
19. *Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N.* Chislennyye metody resheniya zadach konveksii-diffuzii [Numerical methods for solving convection-diffusion problems. Stereotype]. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2015, 248 p.
20. *Oyarzun G., Borrell R., Gorobets A., Oliva A.* MPI-CUDA sparse matrix–vector multiplication for the conjugate gradient method with an approximate inverse preconditioner, *Computers and Fluids*, 2014, Vol. 92, pp. 244-252. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.10.035.
21. *Zheng Liang, Gerya Taras, Knepley Matthew, Yuen David, Zhang Huai, Shi Yaolin.* Implementation of a multigrid solver on a GPU for Stokes equations with strongly variable viscosity based on Matlab and CUDA, *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2014, 28 (1), pp. 50-60. DOI: 10.1007/978-3-642-16405-7_21.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. И.М. Губайдуллин.

Грачева Наталья Николаевна – Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ; e-mail: nata.grachewa2011@yandex.ru; г. Зерноград, Россия; тел.: 89081908999; кафедра математики и биоинформатики; к.т.н.; доцент.

Литвинов Владимир Николаевич – e-mail: litvinovvn@rambler.ru; тел.: 89185172138; кафедра математики и биоинформатики; к.т.н.; доцент.

Руденко Нелли Борисовна – e-mail: nelli-rud@yandex.ru; тел.: 89081908999; кафедра математики и биоинформатики; к.т.н.; доцент.

Никитина Алла Валерьевна – Южный федеральный университет, e-mail: nikitina.vm@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896260069; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н.; профессор.

Чистяков Александр Евгеньевич – Донской государственный технический университет; e-mail: cheese_05@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89508593872; кафедра математики и информатики; д.т.н.

Gracheva Natalia Nikolaevna – Azov-Black Sea Engineering Institute of the Don State Agrarian University; e-mail: nata.grachewa2011@yandex.ru; Zernograd, Russia; phone: +79081908999; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Litvinov Vladimir Nikolaevich – e-mail: litvinovvn@rambler.ru; phone: +79185172138; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rudenko Nelly Borisovna – e-mail: nelli-rud@yandex.ru; phone: +79081908999; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Nikitina Alla Valerievna – Southern Federal University; e-mail: nikitina.vm@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79896260069; the department of Intelligent and multiprocessor systems; dr. of eng. sc.; professor.

Chistyakov Alexander Evgen'evich – Don State Technical University; e-mail: cheese_05@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79508593872; the department of mathematics and informatics; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-105-119

И.Б. Сафроненкова, А.Б. Клименко

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В ГРУППЕ БПЛА*

Рассмотрена проблема распределения вычислительной нагрузки в группе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при осуществлении мониторинга некоторой области в изменяющихся условиях внешней среды, которая оказывает непосредственное влияние на потребление бортового энергоресурса. Описан один из этапов решения задачи мониторинга, осуществляемого гетерогенной группой БПЛА, заключающийся в распределении БПЛА по полосам сканирования. Отмечено, что при выполнении данного этапа, отсутствует возможность учета факторов влияния окружающей среды, что важно ввиду ограниченности бортовых энергоресурсов. В связи с этим, весьма вероятна ситуация, когда БПЛА не в состоянии выполнить назначенную на него подзадачу, что ставит под угрозу выполнения всей миссии группы. Во избежание данной ситуации, предложено использовать методику принятия решения о необходимости перераспределения нагрузки в группе мобильных роботов (МР). В основе принятия решения лежит процедура онтологического анализа, позволяющая ограничить число вариантов для переноса нагрузки. Разработана модель онтологии распределения вычислительной нагрузки в группе БПЛА, учитывающая возможность привлечения дополнительной производительности либо за счет ресурсов соседних БПЛА, либо за счет устройств «туманного» слоя. Приведены примеры продукционных правил, на основе которых принимается решение о необходимости переноса нагрузки. Показано, что при увеличении числа изменений условий окружающей среды, время использования дополнительных вычислительных ресурсов уменьшается, что, приводит к необходимости привлечения их большего объема для выполнения поставленной задачи. Проведена сравнительная оценка объема привлекаемых ресурсов при реализации двух методов-аналогов решения

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №20-04-60485 и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН АААА-А19-119011190173-6.

задачи переноса вычислительной нагрузки в зависимости от частоты изменений условий окружающей среды. Результаты вычислительных экспериментов показали, что эффективность применения метода на основе онтологического анализа в динамичной среде выше, чем метода на основе ЛГУ (локальных групп устройств). Это позволяет увеличить время совместного выполнения миссии группой роботов.

Группа БПЛА; мониторинг; онтология; распределение вычислительной нагрузки; «туманные» вычисления; «облачные» вычисления.

I.B. Safronenkova, A.B. Klimenko

THE ESTIMATION OF CHANGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS INFLUENCE ON THE WORKLOAD DISTRIBUTION IN THE UAV GROUP

The paper considers the problem of workload distribution in a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) when monitoring a certain area in a changing environment, which has a direct impact on the onboard energy resources consumption. The stage of a monitoring problem-solving, which includes the distribution of UAVs over scanning bands, is described here. When this stage is carried, there is no opportunity to take into account the factors of environmental impact. But these factors are crucial due to the limited onboard energy resources. In this regard, a situation is very likely when the UAV is not able to complete the sub-task assigned to it, which jeopardizes the completion of the entire mission of the group. To avoid this situation, it is proposed to use the technique of a decision-making on the need to relocate the workload in a group of mobile robots (MR). The decision-making is based on the ontological analysis procedure, which allows limiting the number of choices for workload relocation. The ontology model of the workload distribution in a group of UAVs was developed. This model takes into account the possibility of additional performance involvement either by means of the resources of neighboring UAVs, or by means of devices of the "foggy" layer. Examples of production rules are given, on the basis of which a decision is made on the need to relocate the workload. A comparative estimation of the resources volume involved in the implementation of two methods of workload relocation problem solving, depending on the frequency of changes in environmental conditions, is carried out. The results of computational experiments have shown that the method based on ontological analysis is more efficient in comparison with the method based on LDG (Local Device Group) in terms of the amount of resources involved. This makes it possible to increase the time of joint mission implementation by the UAV group.

UAV group; monitoring; ontology; workload relocation; fog-computing; cloud-computing.

Введение. В настоящее время системы мониторинга и диагностики находят широкое применение во многих областях человеческой деятельности: в промышленном производстве и на объектах инфраструктуры для оценки состояния сложных технических объектов [1], в социально-экономической сфере для оценки и принятия управленческих решений [2], в здравоохранении [3], в сфере наблюдения за природными явлениями и предотвращения их опасных последствий [4]. Большое разнообразие сфер применения систем мониторинга и диагностики, наряду с высокими требованиями (быстродействие, надежность, возможность решения поставленных задач в режиме реального времени) [5, 6], предъявляемыми к таким системам, актуализирует проблему их эффективного функционирования в сложных условиях.

Наиболее перспективной архитектурой подсистем управления сложными системами является распределенная архитектура на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений [7–9]. Такая архитектура подразумевает решение общих задач (в том числе, задач управления) в «облачном» слое, а задачи сбора данных и их предварительная обработка решаются, как правило, за счет устройств «туманного» и «краевого» слоев.

Зачастую, одним из компонентов систем мониторинга является группа мобильных роботов. Например, в работе [10], предложено использовать мультиробототехнический комплекс на базе гетерогенной группы БПЛА в качестве компонента системы мониторинга. Применение мультиробототехнических комплексов позво-

ляет снизить противоречивые и трудно достижимые требования, предъявляемые к отдельным многофункциональным роботам группы. Групповое применение роботов, зачастую, не предполагает наличие на борту какого-либо значительного энергоресурса, что, в свою очередь позволяет миниатюризировать размеры МР. Однако данный подход также имеет ряд недостатков, среди которых ограниченный бортовой энергоресурс и радиус действия МР. Для решения данной проблемы в состав группы МР вводят роботов-ретрансляторов, которые при наличии ресурсов могут выполнять также функции лидеров группы и «хранилища» данных.

Важно отметить, что окружающая среда, в которой МР выполняет поставленные перед ним задачи, оказывает непосредственное влияние на объем расходуемых бортовых ресурсов [11, 12]. Например, при выполнении мониторинга, одной из задач является построение оптимальной траектории перемещения робота (группы роботов), которая весьма трудоемкая и может решаться, в том числе, с использованием графовых моделей [13]. Изменяющиеся условия окружающей среды приводят к необходимости многократного пересчета траектории, что актуализирует вопрос об эффективном расходе имеющихся бортовых ресурсах. В противном случае, может сложиться ситуация, когда выполнение поставленной перед МР задачи становится невозможным.

В данной работе предложена методика, включающая процедуру онтологического анализа и позволяющая принять решение о необходимости перераспределения вычислительной нагрузки в группе МР на примере решения задачи сканирования некоторой области гетерогенной группой БПЛА под управлением БПЛА-лидера с учетом изменяющихся условий окружающей среды.

Подзадача распределения БПЛА по полосам сканирования. Формальная постановка задачи мониторинга, осуществляемого гетерогенной группой БПЛА, приведена в работе [14] и предполагает выполнение нескольких этапов, последний из которых заключается в определении конкретной полосы (траектории) сканирования для каждого БПЛА подгруппы.

После того, как БПЛА R_j ($j \in [1, N]$) группы распределены по подобластям сканирования, необходимо определить конкретную полосу сканирования для каждого БПЛА.

Пусть для сканирования подобласти S_s выделено N_s БПЛА. То есть подобласть S_s разделена на N_s полос шириной не более L .

Сначала нужно определить так называемые точки входа-выхода БПЛА для каждой полосы. Для каждой полосы может быть определено по две такие точки, что иллюстрируется рис. 1.

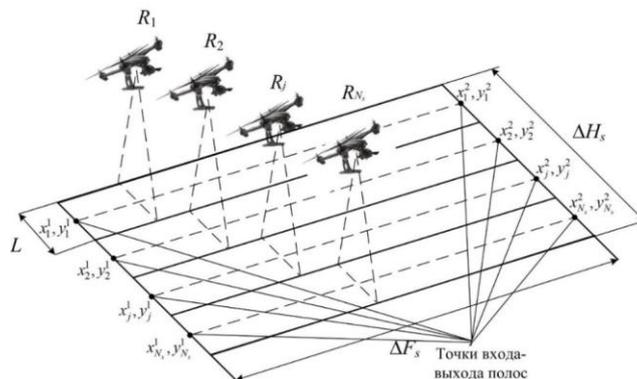


Рис. 1. Точки входа-выхода полос сканирования

Координаты точек входа и выхода $x_{j_s}^1, y_{j_s}^1 >$ и $x_{j_s}^2, y_{j_s}^2 >$ ($j = \overline{1, N_s}$), определяемыми выражениями

$$\begin{cases} \bar{x}_{j_s}^1 = x_s^c - \frac{\Delta F_s}{2}, \\ \bar{y}_{j_s}^1 = y_s^c - \frac{\Delta H_s}{2} + (j_s - 1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_{j_s}^1 = x_s^c + (\bar{x}_{j_s}^1 - x_s^c) \cdot \cos \varphi_s - (\bar{y}_{j_s}^1 - y_s^c) \cdot \sin \varphi_s, \\ y_{j_s}^1 = y_s^c + (\bar{x}_{j_s}^1 - x_s^c) \cdot \sin \varphi_s + (\bar{y}_{j_s}^1 - y_s^c) \cdot \cos \varphi_s. \end{cases} \quad (1)$$

и

$$\begin{cases} \bar{x}_{j_s}^2 = x_s^c + \frac{\Delta F_s}{2}, \\ \bar{y}_{j_s}^2 = y_s^c - \frac{\Delta H_s}{2} + (j_s - 1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_{j_s}^2 = x_s^c + (\bar{x}_{j_s}^2 - x_s^c) \cdot \cos \varphi_s - (\bar{y}_{j_s}^2 - y_s^c) \cdot \sin \varphi_s, \\ y_{j_s}^2 = y_s^c + (\bar{x}_{j_s}^2 - x_s^c) \cdot \sin \varphi_s + (\bar{y}_{j_s}^2 - y_s^c) \cdot \cos \varphi_s, \end{cases} \quad (2)$$

где ΔF_s – длина области сканирования S_s ;

ΔH_s – ширина области сканирования S_s ;

L – ширина полосы сканирования БПЛА;

φ_s – угол ориентации подобласти сканирования S_s ;

$x_s^c, y_s^c >$ – координаты геометрических центров подобластей сканирования;

$\bar{x}_{j_s}^1, \bar{y}_{j_s}^1 >$, $\bar{x}_{j_s}^2, \bar{y}_{j_s}^2 >$ – промежуточные значения координат центров полос до поворота на угол φ_s .

Полученные значения координат точек входа-выхода полос своей подобласти каждый БПЛА-«лидер» RL_s заносит в распределенный реестр, чтобы эти значения были доступны для остальных БПЛА-«лидеров».

Так как на предыдущем шаге было определено, что численность подгруппы соответствует количеству полос сканирования, на которые может быть разделена соответствующая подобласть, то каждому БПЛА R_{j_s} ($j_s \in [1, N_s]$) БПЛА-«лидер» RL_s , назначенный на данную подобласть определяет полосу сканирования, опять же используя один из указанных выше алгоритмов решения задачи о назначениях.

Однако предварительно необходимо определить для каждой полосы каждой подобласти точки входа $x_{j_s}^1, y_{j_s}^1 >$ или $x_{j_s}^2, y_{j_s}^2 >$. Во избежание аварийных ситуаций в примыкающих (смежных) по длине подобластях области P_i , движение БПЛА R_{j_s} ($j_s \in [1, N_s]$) осуществлялось в одну сторону.

Решение о выборе точек входа для своей подгруппы принимают соответствующие БПЛА-«лидеры», например, по минимуму суммарных перемещений БПЛА R_{j_s} ($j_s \in [1, N_s]$), назначенных на эти подобласти.

Методика принятия решения о необходимости перераспределения нагрузки в группе БПЛА. В рамках данной работы, будем полагать, что группа БПЛА должна выполнять сканирование некоторой области, причем распределенная архитектура подсистемы управления данным процессом должна быть реализована на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений (рис. 2).

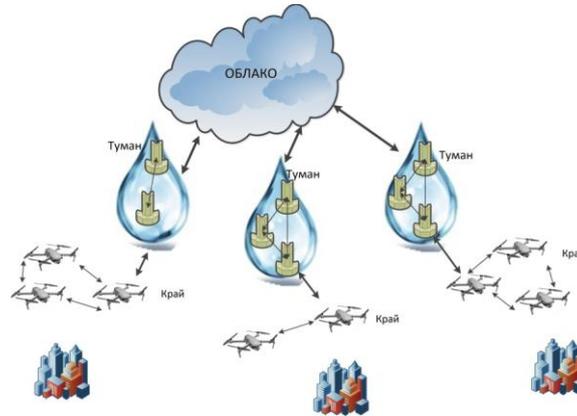


Рис. 2. Архитектура подсистемы управления на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений

Поскольку условия окружающей среды, в которой функционирует группа БПЛА, трудно предсказуемы, изменчивы, и оказывают непосредственное влияние на объем расходуемых бортовых ресурсов, то после назначения полос сканирования на каждый БПЛА, может сложиться ситуация, связанная с невозможностью выполнения подзадачи определенным БПЛА ввиду ограниченности его ресурсов. Групповое взаимодействие роботов подразумевает совместное решение общей задачи, т.е. каждый робот должен действовать в интересах всех группы для успешного выполнения миссии. В случае, если бортовых ресурсов БПЛА недостаточно для выполнения поставленной перед ним задачи, возможны следующие варианты решений данной проблемы:

1. Перераспределение нагрузки между БПЛА, входящих в подгруппу, таким образом, чтобы миссия, возложенная на данную подгруппу, была выполнена в срок.
2. Привлечение дополнительных ресурсов за счет устройств «туманного» слоя для выполнения данной подзадачи.
3. Перераспределение полос сканирования.

Будем полагать, что каждый БПЛА осведомлен о состоянии ресурсов и локализации в пространстве своих соседей, которые находятся в пределах прямой видимости в контексте коммуникационной сети. Каждый БПЛА подгруппы с некоторой периодичностью отправляет данные о состоянии своих ресурсов и о своем положении в пространстве БПЛА-лидеру. Таким образом, каждый БПЛА способен оценить состояние своих ресурсов для решения выделенной ему подзадачи. Если этих ресурсов недостаточно, то БПЛА, имея сведения о соседних БПЛА, формирует предложение БПЛА-лидеру о возможном варианте переноса нагрузки на вычислительные ресурсы соседнего БПЛА. БПЛА-лидер, в свою очередь, принимает решение о целесообразности или нецелесообразности данного переноса. В случае, если БПЛА не находит вариантов для переноса нагрузки из числа своих соседей, то, он сообщает об этом лидеру, и тот принимает решение либо о привлечении дополнительных ресурсов из «туманного» слоя, либо о перераспределении полос сканирования. Данные решения БПЛА-лидер принимает на основании продукционных правил, применяемых к модели онтологии, в которой отражена информация о переносимой задаче, сведения о ресурсах и локализации БПЛА, входящих в рассматриваемую подгруппу, и сведения о ресурсах и локализации устройств «туманного» слоя. Методика принятия решения о необходимости переноса вычислительной нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА под управлением лидера представлена на рис. 3.

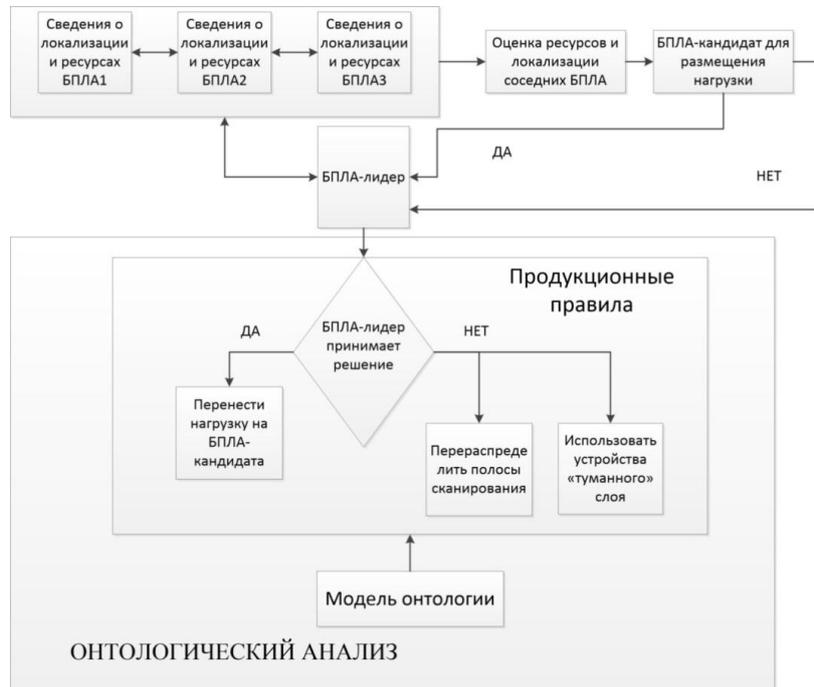


Рис. 3. Схема методики принятия решения о необходимости переноса вычислительной нагрузки

Процедура онтологического анализа показала свою эффективность в решении задач переноса вычислительной нагрузки в распределенных системах различного назначения и подробно описана в работах [15, 16]. Ключевая идея онтологического анализа заключается в сокращении пространства поиска узлов-кандидатов для размещения вычислительной нагрузки в распределительной задаче, что сокращает время принятия решения о размещении. Сравнительная схема решения задачи переноса вычислительной нагрузки приведена на рис. 4,а,б).

Данная процедура включает в себя выполнение следующих этапов:

1. Классификация совокупности входных данных в соответствии с классами онтологии, описывающей рассматриваемую область.
2. Применение системы продукционных правил к классам онтологии с целью ограничения множества вычислительных узлов, полученного в результате сбора сведений об имеющихся ресурсах.
3. Принятие решения о предпочтительном множестве узлов для переноса вычислительной нагрузки.

В соответствии с предложенной методикой необходимо разработать модель онтологии, описывающей область распределения нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА с учетом влияния факторов окружающей среды, и продукционные правила, на основании которых происходит принятие решения о необходимости переноса нагрузки.

Разработка модели онтологии распределения нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, функционирующей в изменяющихся условиях окружающей среды. На основании методологии, описанной в [17] в настоящей работе разработана модель онтологии распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, функционирующих в условиях изменяющейся среды.

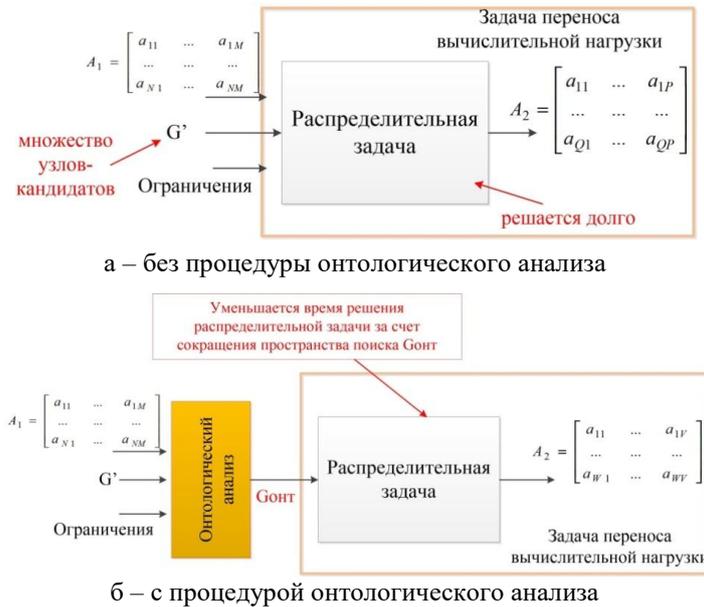


Рис. 4. Схемы решения задачи переноса вычислительной нагрузки

Для полного и корректного описания рассматриваемой предметной области в виде модели онтологии, необходимо сформировать множество концептов, которые будут отражены в онтологии в виде иерархии классов.

Таким образом, модель онтологии включает следующие концепты (рис. 5):

- ◆ Окружающая среда: скорость и направление ветра, осадки, препятствия.
- ◆ БПЛА: ресурсы (производительность, энергоресурс, загруженность), ширина полосы сканирования, скорость сканирования, текущие координаты в пространстве.
- ◆ «Туманный» слой: производительность, загруженность, координаты в пространстве.
- ◆ Задача: тип, вычислительная сложность, срок исполнения, объемы передаваемых и получаемых данных.
- ◆ Оптимизируемый параметр: площадь сканирования, время выполнения миссии.



Рис. 5. Иерархия классов модели онтологии

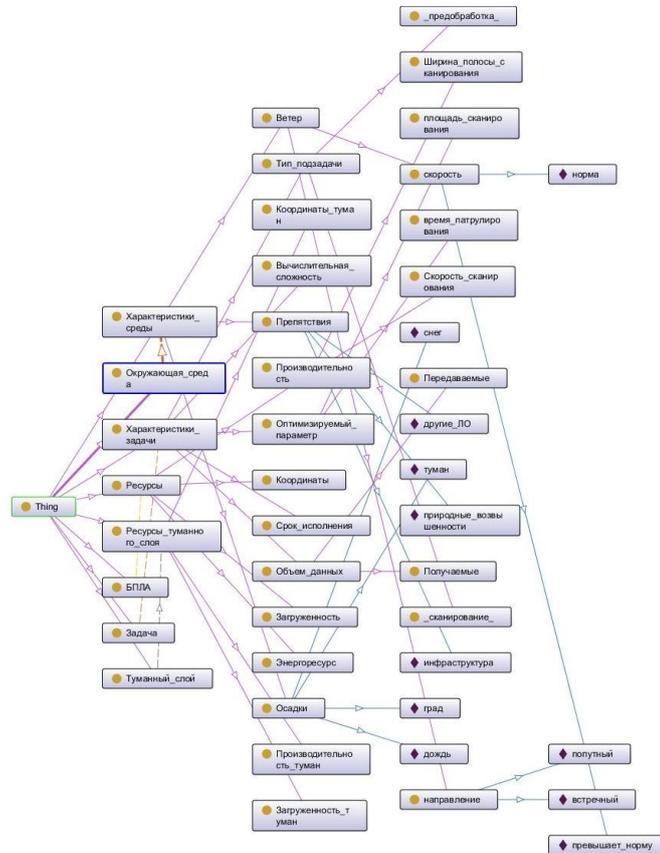


Рис. 6. Модель онтологии распределения нагрузки в гетерогенной группе БПЛА под управлением лидера

Разработка продукционных правил распределения вычислительных ресурсов в группе БПЛА, функционирующих в условиях изменяющейся среды. В основе этапа принятия решения о предпочтительном БПЛА, готовом выделить часть своих ресурсов для решения некоторой подзадачи, изначально назначенной на другой БПЛА, лежит система продукционных правил, которая связывает класс онтологии, описывающей область распределения нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА с учетом влияния факторов окружающей среды. Основой для разработки продукционных правил послужили главные принципы распределения подзадач по процессорам в гетерогенных вычислительных системах [18, 19].

При разработке продукционных правил будем полагать следующее:

1. Каждый БПЛА, входящий в подгруппу имеет ограниченный бортовой ресурс и радиус действия коммуникационных сетей.
2. Устройства «туманного» слоя статичны и обладают некоторыми вычислительными ресурсами.

Случай 1. Рассмотрим случаи возможного перераспределения нагрузки между МР, входящих в подгруппу.

ЕСЛИ характеристики задачи {тип_задачи = сканирование; вычислительная сложность=Θ; оптимизируемый_параметр = время_выполнения_миссии; объем_данных=большой; срок_исполнения=Т} **И** характеристики среды {осадки = дождь, ветер = встречный, препятствия = нет} **И** ресурсы {загруженность = ψ; коорди-

наты = x_j, y_j >; скорость_сканирования = V_j ; ширина_полосы_сканирования = L_j }
 соответствуют характеристики задачи **ТО** переносить на БПЛА { $d_i = \min$ }
 где d_i – расстояние от БПЛА, на который изначально была назначена подзадача, до БПЛА, который способен выполнить ее в срок.

Случай 2. Если среди МР, входящих в подгруппу, невозможно перераспределить задачу, то необходимо воспользоваться ресурсами «туманного» слоя

ЕСЛИ характеристики задачи {тип_задачи = сканирование; вычислительная сложность=Θ; оптимизируемый_параметр = время_выполнения_миссии; объем_данных=большой; срок_исполнения=Т} **И** характеристики среды {осадки = дождь, ветер = встречный, препятствия = нет} **И ресурсы** {загруженность = ψ; координаты = x_j, y_j >; скорость_сканирования = V_j ; ширина_полосы_сканирования = L_j } не соответствуют характеристики задачи **ТО** переносить на узел в «тумане» {загруженность_туман = ψ_t ; производительность_туман = ρ_t ; координаты-туман = $\langle x_t, y_t \rangle$; $d_i = \min$ }

где d_i – расстояние от БПЛА, на который изначально была назначена подзадача, до узла, расположенного в «туманном» слое, способном выполнить ее в срок.

Работоспособность предложенного подхода была проверена с использованием вычислительных экспериментов.

Вычислительный эксперимент. Предположим что, собственных бортовых энергоресурсов БПЛА недостаточно для решения поставленной задачи. В этом случае необходимо перераспределить вычислительную нагрузку таким образом, чтоб общая миссия завершилась успешно, т.е. решить задачу перераспределения нагрузки за ограниченное время, в течение которого все БПЛА группы способны выполнять поставленные перед ними задачи. В соответствии с описанной выше методикой распределения вычислительной нагрузки, существует два варианта решения сложившейся проблемы: распределение нагрузки между БПЛА группы и привлечение ресурсов из «туманного» слоя. В обоих случаях речь идет об использовании дополнительных ресурсов. Стоит также отметить, что в данных случаях имеют место изменяющиеся условия среды (изменяющиеся расстояния между БПЛА-лидером или между БПЛА), которые оказывают непосредственное влияние на распределение нагрузки. Например, если БПЛА-лидер в процессе сканирования достаточно удален от устройства «туманного» слоя, то передача данных для обработки на данное устройство нецелесообразна. Поднимается вопрос о смене ролей в группе МР, что, с большой вероятностью, приведет к необходимости решения задачи перераспределения нагрузки. Далее будем полагать, что количество изменений условий среды равно количеству перераспределений нагрузки. В свою очередь, объем привлекаемых ресурсов прямо пропорционален времени использования данных ресурсов:

$$W_{дон} = T_{удн} \cdot P_{удн} \quad (3)$$

где $W_{дон}$ – объем привлекаемых дополнительных ресурсов;

$T_{удн}$ – время использования дополнительных ресурсов;

$P_{удн}$ – дополнительная производительность привлекаемых устройств.

При ограниченных значениях производительности устройств для выполнения большего объема работы, необходимо увеличить время использования дополнительных ресурсов с учетом изменений условий окружающей среды:

$$T_{удн} = T_{кфз} - N \cdot T_{пви} \quad (4)$$

где $T_{кфз}$ – время выполнения задачи сканирования выделенной области;

N – количество перераспределений вычислительной нагрузки в единицу времени;

$T_{пви}$ – время решения задачи переноса вычислительной нагрузки.

Из формул (3), (4), видно, что объем привлекаемых ресурсов ($W_{доп}$) зависит от количества перераспределений N и времени, необходимого для осуществления перераспределений $T_{пер}$. Дадим пояснения в контексте решаемой задачи. Пусть после назначения каждому БПЛА подгруппы полосы сканирования, возникает ситуация, что имеющихся ресурсов недостаточно для выполнения миссии. В этом случае необходимо перераспределить нагрузку между БПЛА группы или дополнительно привлечь устройства «туманного» слоя, причем сделать это как можно быстрее. Вопросы, связанные с минимизацией параметра $T_{пер}$ были подробно рассмотрены в работах [20, 21].

Для подтверждения эффективности предложенной методики, проведены вычислительные эксперименты, включающие сравнительный анализ методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки на основе онтологий и ЛГУ. Последний выбран в качестве метода-аналога ввиду того, что большинство существующих методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки не учитывают гетерогенность, наличие транзитных участков сети или имеют высокую вычислительную сложность. В ходе экспериментальных исследований было получено, что время реализации метода на основе онтологий в среднем в 2,51 раза меньше времени реализации метода на основе ЛГУ [20]. Графики, отражающие объемы привлекаемых ресурсов в зависимости от количества изменений условий среды для различных поисковых алгоритмов при реализации методов-аналогов решения задачи переноса вычислительной нагрузки, приведены на рис. 7–10.

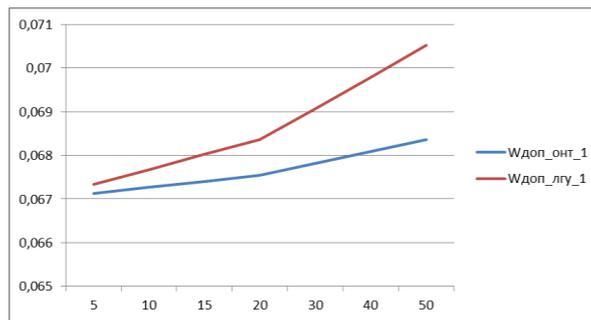


Рис. 7. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологий и метода на основе ЛГУ от N при $T_{пер} = 1/1000T_{фз}$ для алгоритма обезьян

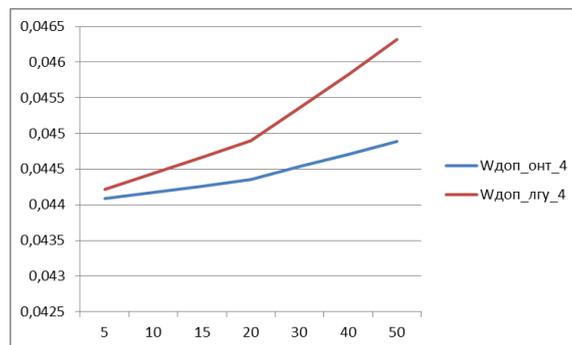


Рис. 8. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологий и метода на основе ЛГУ от N при $T_{пер} = 1/1000T_{фз}$ для метода отжига

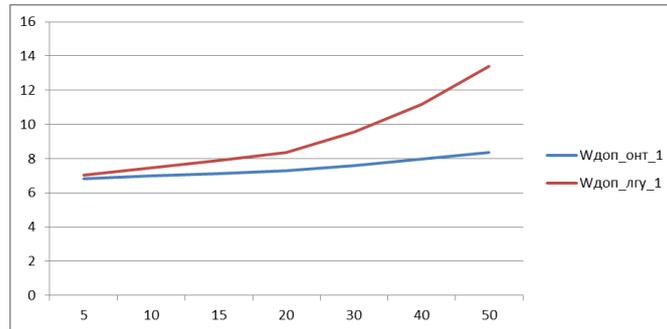


Рис. 9. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологии и метода на основе ЛГУ от N при $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$ для алгоритма обезьян

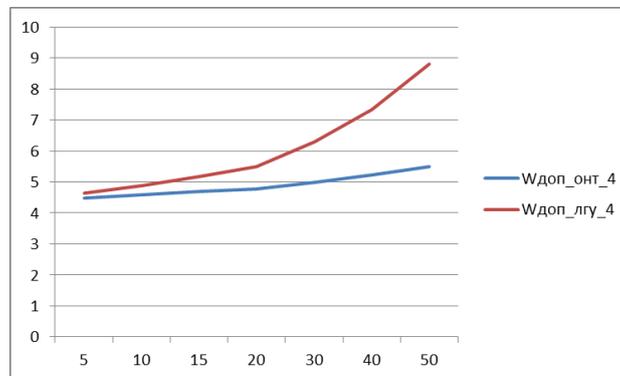


Рис. 10. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологии и метода на основе ЛГУ от N при $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$ для метода отжига

На основе приведённых графиков можно сделать следующие выводы:

1. С ростом числа перераспределений вычислительной нагрузки происходит увеличение объема привлекаемых ресурсов.
2. Использование метода на основе онтологий позволяет привлекать до 3 % меньше дополнительных ресурсов в сравнении с методом на основе ЛГУ при $T_{\text{пвн}}=1/1000T_{\text{фз}}$ и до 60% при $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$, поскольку занимает меньше времени для принятия решения о переносе нагрузки.
3. Эффективность использования метода на основе онтологий в динамичной среде выше по сравнению с методом на основе ЛГУ.

Заключение. Настоящая работа посвящена проблеме распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, осуществляющих мониторинг местности в изменяющихся условиях окружающей среды. Как известно, факторы внешней среды оказывают непосредственное влияние на объем расходуемых МР ресурсов, что влияет на успешность выполнения миссии. Для предотвращения ситуаций, когда выполнение миссии находится под угрозой, ввиду недостаточности собственных ресурсов БПЛА, была разработана методика, позволяющая принять решение о необходимости переноса нагрузки. В основе данной методики лежит процедура онтологического анализа, позволяющая ограничить множество вариантов для перераспределения нагрузки в каждом конкретном случае и ускорить процесс

принятия решения. Разработаны модель онтологии распределения вычислительных ресурсов, позволяющая учесть, в том числе факторы влияния внешней среды, и примеры продукционных правил, на основании которых происходит принятие решения о необходимости переноса. Исследованы зависимости объема привлекаемых ресурсов от частоты изменения условий внешней среды для методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки на основе онтологического анализа и на основе ЛГУ. Результаты проведенных экспериментов показали, что реализация метода на основе онтологий позволяет привлекать на 3% меньше ресурсов при $T_{\text{пен}}=1/1000T_{\text{фз}}$ и до 60% при $T_{\text{пен}}=1/100T_{\text{фз}}$ в сравнении с методом на основе ЛГУ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод на основе онтологий более устойчив к изменениям внешней среды. Это позволяет увеличить время совместного выполнения миссии группой роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Захаров Н.С., Резников Д.О. и др. Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем: учебное пособие. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 632 с.
2. Демешко Т.С. Понятие, сущность, задачи мониторинга и прогноза в системе управления регионом // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. – 2020. – № 13. – С. 57-63.
3. Фролов С.В., Лядов М.А., Комарова И.А., Остапенко О.А. Современные тенденции развития медицинских информационных систем мониторинга // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 66-75.
4. Капустян С.Г., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В. Метод робастно устойчивого управления движением группы мобильных роботов с «лидером» для систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 66-73.
5. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
6. ГОСТ Р 56875-2016. Информационные технологии. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий. – М.: Стандартинформ, 2019. – 40 с.
7. Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н. Обзор технологий организации туманных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2020. – № 9 (3). – С. 35-63.
8. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 112. – P. 630-640.
9. Naeem R.Z., Bashir S., Amjad M.F., Abbas H., and Afzal H. Fog computing in internet of things: Practical applications and future directions // Peer-to-Peer Networking and Applications. – 2019. – Vol. 12, No. 5. – P. 1236-1262.
10. Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Информационное обеспечение групповых действий БЛА при решении задач мониторинга больших территорий // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов: Матер. II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова ("Опасные явления - II"). г. Ростов-на-Дону (6–10 июля 2020 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. – С. 332-335.
11. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – Вып. № 1. – С. 7-15.

12. БПЛА в условиях арктического региона // Neftegaz.ru. – 2019. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/473748-bpla-v-usloviyakh-arkticheskogo-regiona>. – Статьи журнала (neftegaz.ru) (дата обращения: 02.07.2021).
13. Мельников А.В., Гайдай В.А., Rogozin E.A. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска // Вестник воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52-62.
14. Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. Метод решения задачи распределения целей в группе БПЛА сетевидной системой управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 12 (185). – С. 55-70.
15. Курейчик В.М., Сафроненкова И.Б. Онтологический подход к реализации технологий распределенных вычислений в сети Интернет // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 71-82.
16. Сафроненкова И.Б., Клименко А.Б. Оценка эффективности методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки в «гуманной» среде // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 156-165.
17. Ной Наталья Ф, МакГиннесс Дэбора Л. Разработка онтологий 101: руководство по созданию Вашей первой онтологии. – URL: http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_101_ruk.pdf (дата обращения: 02.07.2021).
18. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. – 184 с.
19. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.
20. Мельник Э.В., Сафроненкова И.Б., Клименко А.Б. Формирование ограничений в задаче переноса вычислительной нагрузки в САПР как условие повышения качества проектирования // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 357-364.
21. Klimenko A.B., Safronenkova I.B. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 1046. – P. 37-48.

REFERENCES

1. Makhutov N.A., Permyakov V.N., Akhmetkhanov R.S., Dubinin E.F., Zakharov N.S., Reznikov D.O. *i dr.* Diagnostika i monitoring sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie [Diagnostics and monitoring of the state of complex technical systems: a textbook]. Tyumen': TIU, 2017, 632 p.
2. Demeshko T.S. Ponyatie, sushchnost', zadachi monitoringa i prognoza v sisteme upravleniya regionom [The concept, essence, tasks of monitoring and forecasting in the regional management system], *Obrazovanie i nauka bez granits: sotsial'no-gumanitarnye nauki* [Education and science without borders: social and humanitarian sciences], 2020, No. 13, pp. 57-63.
3. Frolov S.V., Lyadov M.A., Komarova I.A., Ostapenko O.A. Sovremennye tendentsii razvitiya meditsinskikh informatsionnykh sistem monitoringa [Modern trends in medical information systems for monitoring], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and PracticeVernadsky University], 2013, No. 2 (46), pp. 66-75.
4. Kapustyan S.G., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V. Metod robustno ustoychivogo upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov s «liderom» dlya sistem monitoringa i prognozirovaniya opasnykh protsessov i obespecheniya bezopasnosti naseleniya i beregovoy infrastruktury [Method of robustly stable motion control of a group of mobile robots with a leader for monitoring and diagnostics systems and ensuring the safety of the population and coastal infrastructure], *Nauka Yuga Rossii* [Science in the south of Russia], 2021, Vol. 17, No. 2, pp. 66-73.
5. GOST R 53564-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Trebovaniya k sistemam monitoring [Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Requirements for monitoring systems]. Moscow: Standartinform, 2019, 16 p.
6. GOST R 56875-2016. Informatsionnye tekhnologii. Sistemy bezopasnosti kompleksnye i integrirovannye. Tipovye trebovaniya k arkhitekture i tekhnologiyam intellektual'nykh sistem monitoringa dlya obespecheniya bezopasnosti predpriyatiy i territoriy [Information technology systems for ensuring the safety of enterprises and territories]. Moscow: Standartinform, 2016, 16 p.

- gies. Comprehensive and integrated security systems. Standart requirements for the architecture, hardware and software intelligent monitoring systems to ensure the safety of enterprises and territories]. Moscow: Standartinform, 2019, 40 p.
7. Kirsanova A.A., Radchenko G.I., Chernykh A.N. Obzor tekhnologiy organizatsii tumannykh vychisleniy [Overview of fog computing organization technologies], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering], 2020, No. 9 (3), pp. 35-63.
 8. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city, *Future Generation Computer Systems*, 2020, Vol. 112, pp. 630-640.
 9. Naeem R.Z., Bashir S., Amjad M.F., Abbas H., and Afzal H. Fog computing in internet of things: Practical applications and future directions, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, Vol. 12, No. 5, pp. 1236-1262.
 10. Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Informatsionnoe obespechenie gruppovykh deystviy BLA pri reshenii zadach monitoringa bol'shikh territoriy [Information support for group actions of uavs when solving problems of monitoring large territories], *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnyuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov: Mater. II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova ("Opasnye yavleniya - II"). g. Rostov-na-Donu (6–10 iyulya 2020 g.)* [Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazards and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges: Materials of the II International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishov ("Dangerous Phenomena - II"). Rostov-on-Don (July 6-10, 2020). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2020, pp. 332-335.
 11. Gorbunov A.A., Galimov A.F. Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na primeneniye i bezopasnost' poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov s bortovym retranslyatorom radiosignala [The influence of meteorological factors on the use and flight safety of unmanned aerial vehicle with side repeater radio], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii* [Scientific and analytical journal bulletin of the St. Petersburg university of the state fire service of the ministry of emergency situations of Russia], 2016, Issue No. 1, pp. 7-15.
 12. BPLA v usloviyakh arkticheskogo regiona [UAVs in the conditions of the Arctic region], *Neftgaz.ru*, 2019. Available at: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/473748-bpla-v-usloviyakh-arkticheskogo-regiona> (accessed 02 July 2021).
 13. Mel'nikov A.V., Gayday V.A., Rogozin E.A. Postroeniye optimal'noy traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii zadachi poiska [Construction of optimal flight path of unmanned aircraft when performing a search task], *Vestnik voronezhskogo instituta MVD Rossii* [The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2017, No. 1, pp. 52-62.
 14. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Zh. Metod resheniya zadachi raspredeleniya tseley v gruppe BPLA setetsentricheskoy sistemoy upravleniya [The method of solving the problem of the distribution of goals in the group of uavs by network-centric control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 12 (185), pp. 55-70.
 15. Kureychik V.M., Safronenkova I.B. Ontologicheskii podkhod k realizatsii tekhnologiy raspredelennykh vychisleniy v seti Internet [An ontological approach to distributed computing technologies implementation on the internet], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 71-82.
 16. Safronenkova I.B., Klimenko A.B. Otsenka effektivnosti metodov resheniya zadachi perenosy vychislitel'noy nagruzki v «tumanny» srede [The efficiency evaluation of workload relocation problem solving methods in «fog-computing» environment], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences], 2020, No. 12, pp. 156-165.
 17. Noy Natal'ya F, MakGinness Debora L. Razrabotka ontologiy 101: rukovodstvo po sozdaniyu Vashey pervoy ontologii [Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology]. Available at: http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_101_ruk.pdf (accessed 02 July 2021).
 18. Gergel' V.P., Strongin R.G. Osnovy parallel'nykh vychisleniy dlya mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem: ucheb. posobie [Fundamentals of parallel computing for multiprocessor computing systems. Training manual]. Nizhniy Novgorod: Izd-vo NNGU im. N.I. Lobachevskogo, 2003, 184 p.

19. *Voevodin V.V., Voevodin V.I.* Parallelnye vychisleniya [Parallel computing]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003, 608 p.
20. *Mel'nik E.V., Safronenkova I.B., Klimenko A.B.* Formirovanie ogranicheniy v zadache perenosa vychislitel'noy nagruzki v RSAPR kak uslovie povysheniya kachestva proektirovaniya [The restrictions forming in the workload relocation problem in DCAD systems as a condition for design quality increasing], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences], 2021, No. 2, pp. 357-364.
21. *Klimenko A.B., Safronenkova I.B.* A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, Vol. 1046, pp. 37-48.

Статью рекомендовала к опубликованию профессор, д.т.н. Г.В. Горелова.

Сафроненкова Ирина Борисовна – Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79604678753; м.н.с.

Клименко Анна Борисовна – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. А.В. Каляева; e-mail: anna_klimenko@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79085067014; с.н.с.; к.т.н.

Safronenkova Irina Borisovna – Southern Federal University; e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79604678753; junior research fellow.

Klimenko Anna Borisovna – Research Institute of Multiprocessor Computation Systems n.a. A.V. Kalyaev; e-mail: anna_klimenko@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085067014; senior research fellow; candidate of technical sciences.

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.056.55

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-120-134

Л.К. Бабенко, А.С. Шумилин, Д.М. Алексеев

АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБЛАЧНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Целью работы является разработка и реализация архитектуры облачной системы хранения, систематизации и обработки результатов обследований (на примере ЭЭГ) и алгоритма обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе полностью гомоморфной криптосистемы. Объектом исследования являются технологии хранения, передачи, обработки и защиты конфиденциальной информации в распределенных медицинских информационных системах. Разработана архитектура облачной платформы распределенного хранения, обработки, систематизации и защиты конфиденциальных данных (результатов медицинских обследований), позволяющая взаимодействовать с различными медицинскими информационными системами и аппаратными средствами диагностики с целью формирования больших данных. Разработан алгоритм обеспечения безопасности медицинских данных, хранимых в облачной платформе в электронном виде, регистрируемых при проведении обследований пациентов с целью расчета среднего значения для каждого из ритмов мозговой активности (по результатам серии обследований за длительный период времени) с использованием алгоритма полностью гомоморфного шифрования. На основе результатов тестирования (анализ времени выполнения таких операций, как: шифрование, дешифрование, сложение, умножение, отношение сигнал шум зашифрованного текста к открытому тексту) из двух потенциальных претендентов на использование в качестве алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схемы BFV и CKKS) выбран оптимальный алгоритм. В результате показано, что схема полностью гомоморфного шифрования CKKS наиболее эффективна, особенно в условиях критичности требований к высокому уровню безопасности конфиденциальных данных, чем обусловлен выбор данной схемы для реализации предложенного в настоящей работе алгоритма.

Защита информации; медицинская информационная система; конфиденциальность; облачные вычисления; информационная безопасность; обработка данных; систематизация данных; большие данные; шифрование.

L.K. Babenko, A.S. Shumilin, D.M. Alekseev

ALGORITHM OF PROTECTING CONFIDENTIAL DATA IN THE CLOUD MEDICAL INFORMATION SYSTEM

The aim of the work is the development and implementation of the architecture of a cloud storage system, systematization and processing of survey results (for example, EEG) and an algorithm for ensuring the protection of confidential data based on a completely homomorphic cryptosystem. The object of the research is the technologies of storage, transmission, processing and protection of confidential information in distributed medical information systems. The architecture of a cloud platform for distributed storage, processing, systematization and protection of confidential data (results of medical examinations) has been developed, which makes it possible to interact with various medical information systems and diagnostic hardware in order to generate big data. An algorithm has been developed to ensure the safety of medical data stored in a cloud platform in

electronic form, recorded during patient examinations in order to calculate the average value for each of the brain activity rhythms (based on the results of a series of examinations over a long period of time) using a fully homomorphic encryption algorithm. Based on the test results (analysis of the execution time of such operations as: encryption, decryption, addition, multiplication, signal-to-noise ratio of ciphertext to plaintext), the optimal algorithm. According to the results of the work, it is shown that the fully homomorphic encryption scheme CKKS is the most effective, especially in the context of the criticality of the requirements for a high level of security of confidential data, which determines the choice of this scheme for the implementation of the algorithm proposed in this work.

Information security; medical information system; privacy; cloud computing; information security; data processing; data systematization; big data, encryption.

Введение. Век всеобщей информатизации и развития информационных технологий оказал значительное влияние на все сферы человеческой жизнедеятельности. Ежедневно каждый из нас использует компьютерные технологии для достижения определенных целей: общение в социальных сетях, поиск нужной информации в сети Интернет, чтение книг, сложные математические расчеты, просмотр видеофильмов, создание программного обеспечения, телемедицина. Ситуацию с актуальностью и быстрыми темпами развития информационных технологий обострила, в том числе, пандемия.

В связи с этим, в настоящее время процессы создания, накопления и обработки информации в сфере здравоохранения становятся все более актуальными, что обусловлено масштабной информатизацией отрасли по всему миру.

В век всеобщей информатизации и активного развития информационных технологий медицинские учреждения в ходе выполнения диагностических исследований обрабатывают и систематизируют значительные объемы данных для последующей реабилитации и лечения пациентов [1].

Эффективность оказываемой медицинской помощи прямо пропорциональна оперативности и удобству использования данной информации специалистами медицинских организаций. Наличие задач, связанных с хранением, систематизацией и обработкой увеличивающихся объемов данных обуславливает актуальность разработки и интеграции в медицинские учреждения медицинских информационных систем (МИС). Возможность оперирования данными в электронном виде обеспечивает оперативность получения врачом необходимой информации о пациенте, что увеличивает скорость принятия решения о постановке диагноза и методах лечения [2, 4].

Анализ проблемы. Медицинские организации в силу законодательства являются операторами персональных данных своих пациентов. Они принимают непосредственное участие в сборе, систематизации, накоплении, хранении, уточнении, обновлении, изменении, распространении и уничтожении такой информации.

Одной из проблем при проектировании медицинских информационных систем является необходимость интеграции механизмов защиты конфиденциальной информации [3].

К категории конфиденциальной информации относят: фамилия, имя, отчество пациента, месяц, дата и место рождения, серия и номер паспорта, адрес регистрации и фактического проживания, идентификационный номер налогоплательщика (ИНН), страховое свидетельство государственного пенсионного страхования (СНИЛС), семейное, социальное положение, образование, профессия, должность, специальность, серия и номер страхового медицинского полиса и его действительность и др.

В связи с тем, что данная категория информации представляет собой, как правило, текстовую форму и ее содержание статично (информация не меняется в режиме реального времени в ходе проведения обследований), ее защита обеспечи-

вается стандартными методами и средствами шифрования. К категории персональных медицинских данных, требующих нетрадиционных подходов к их защите, относят динамически изменяющиеся показатели результатов медицинских обследований пациентов (например, показателей электроэнцефалограммы).

Например, каждый пациент регистрирует в процессе проведения ЭЭГ-обследований (сеансов) показатели биоритмов головного мозга (альфа, бета и тета ритмы). Изменение волновой активности (по каждому из видов ритмов) представляет собой изменяющийся ряд числовых данных (обновление один раз за одну секунду). Для правильной постановки диагноза и выбора тактики лечения пациентов важна динамика изменения показателей и их средние значения за длительный период времени (например, суточное ежедневное мониторирование мозговой активности в течение одного месяца реабилитации пациента).

Как правило, показатели мозговой активности (альфа, бета и тета ритмы) определяют и регистрируют носимые беспроводные устройства для мониторинга состояния здоровья. Зарегистрированные результаты медицинских исследований могут передаваться в медицинские организации (учреждения здравоохранения) в автоматическом режиме по сети или посредством беспроводных каналов связи. Доступ со стороны потенциального злоумышленника к передаваемым данным с целью их изменения может оказаться критичным для пациента. Это обусловлено не только вероятной дискредитацией данных с точки зрения доступа к ним со стороны третьих лиц (например, с целью оповещения страховых компаний), но и потенциальной опасностью изменения результатов медицинских обследований. Например, в случае, если доктор не уведомлен о том, что статистика показателей и их результаты искажены, возникает риск установить некорректный диагноз, что впоследствии может привести к тому, что устройства персонализированной медицины подадут медикаменты в неправильной дозировке. Это, в свою очередь, может нанести непоправимый вред состоянию здоровья и даже поставить под угрозу саму жизнь пациента [5, 6].

В связи с тем, что требованиями законодательства установлена необходимость защиты персональных данных, ключевой задачей при реализации облачной системы хранения, систематизации и обработки медицинских данных является обеспечение безопасности хранимой информации.

Научная новизна работы заключается в разработке медицинской информационной системы на базе облачных технологий для сбора, систематизации и обработки результатов обследований и разработке эффективного алгоритма защиты конфиденциальных данных с использованием систем полностью гомоморфного шифрования.

Данный подход отличается от известных использованием механизмов защиты медицинских данных, позволяющих выполнять облачные вычисления над зашифрованными результатами обследований (без предварительной расшифровки) в недоверенной среде, а также возможностью интеграции с большинством существующих программно-аппаратных комплексов и средств диагностики. Ключевой особенностью медицинской информационной системы является подсистема механизмов защиты, которая представляет собой алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе полностью гомоморфной криптосистемы, предложенный, реализованный и исследованный автором.

Новизна разработанного алгоритма заключается в возможности его использования для различных типов данных (результатов различных видов медицинских обследований), одновременном снижении времени работы в медицинской информационной системе (за счет отсутствия необходимости расшифровки данных для подсчета средних значений параметров за длительный период времени) и повышении эффективности систем обеспечения защиты информации.

Постановка задачи. Целью работы является разработка и реализация архитектуры облачной системы хранения, систематизации и обработки результатов обследований (на примере ЭЭГ) и алгоритма обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе полностью гомоморфной криптосистемы.

Достижение поставленной цели предполагает необходимость решения следующих задач:

- ◆ изучение существующих архитектурных решений при проектировании информационных процессов в области здравоохранения и медицины;
- ◆ анализ ключевых особенностей технологий хранения и систематизации данных медицинских обследований, аккумулирующихся в цифровых системах электронной регистратуры;
- ◆ выполнить проектирование архитектуры распределенной облачной платформы хранения, систематизации и обработки конфиденциальных данных медицинских обследований, позволяющую регистрировать и получать данные с использованием различных аппаратных средств диагностики;
- ◆ разработать алгоритм обеспечения безопасности медицинских данных, хранимых в облачной платформе в электронном виде, регистрируемых при проведении обследований пациентов с целью расчета среднего значения для каждого из ритмов мозговой активности (по результатам серии обследований, например, в ходе курса реабилитации методом биологической обратной связи);
- ◆ выбрать эффективный алгоритм полностью гомоморфного шифрования для использования в рамках разработанного алгоритма;
- ◆ создать интегрируемую облачную платформу распределенного хранения, анализа и систематизации медицинских данных и систему обеспечения безопасности с использованием разработанного алгоритма защиты;
- ◆ провести анализ эффективности предложенного алгоритма защиты конфиденциальной медицинской информации в условиях интеграции в разработанную облачную платформу.

Анализ современного состояния исследований. В работе [11] Котяшичев И.А. и Бырылова Е.А. рассматривают возможность использования облачных технологий с целью повышения эффективности внедрения информационных систем в различные отрасли медицины. Среди наиболее распространенных способов обеспечения безопасности данных авторы выделяют шифрование. Однако в ходе работы отмечается неотъемлемая проблема симметричных систем шифрования – проблема распределения ключей, что осложняет процесс работы с такими системами. Проблема заключается в том, что хранение ключей на облачном сервере нецелесообразно, поскольку пользователь, имеющий доступ к облачным серверам, получает доступ к ключу, а следовательно, и к расшифрованным данным [7, 8].

Керейтова М.Р. и Малыш В.Н. в работе [12] отмечают проблему обеспечения информационной безопасности конфиденциальных данных пациентов как одну из наиболее важных при создании и проектировании медицинских информационных систем. Вопрос защиты информации рассматривается на примере распределенной информационной системы Департамента охраны здоровья населения Кемеровской области, охватывающей все лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ) Кемеровской области. Авторы предлагают комплексный подход к решению проблемы: ввести контроль за рабочими станциями на предмет необычно высокой активности, в полной мере использовать антивирусную защиту, следить за всеми обновлениями для имеющихся операционных систем, использовать многоуровневую аутентификацию пользователей, предполагающую использование USB-ключей, смарт-карт, паролей, файловых ключей. Однако предлагаемый авторами подход не учитывает механизмов обеспечения защиты данных в аспекте предотвращения их

утечки и/или несанкционированного доступа при передаче и хранении информации в системах с архитектурой клиент-сервер. Таким образом, в рамках данной работы рассмотрены способы и средства, обеспечивающие защиту на уровне доступа к рабочим станциям пользователям системы [9, 10].

Бойченко И.В. в работе [13] отмечает важность проблемы реализации прав граждан в области защиты персональных данных пациентов. Автор рассматривает возможность использования медицинских информационно-аналитических центров в структуре здравоохранения, акцентируя внимание лишь на правовом и юридическом аспектах проблемы. Предварительный анализ, проведенный автором, позволяет сделать вывод о большом потенциале использования облачных технологий в решении задач современного здравоохранения. Однако для их повсеместного внедрения требуется грамотное техническое решение, направленное на разработку методов обеспечения безопасности передаваемой информации и конфиденциальности персональных данных пациентов.

В работе [14] Rohan Jathanna отмечает уязвимость облачных систем к атакам со стороны злоумышленников (DDoS-атаки, атаки с целью проникновения на сервер, несанкционированный доступ к базам данных). Для предотвращения потери доступа к конфиденциальным данным автор предлагает использовать возможности средств резервного копирования. Противодействие несанкционированному доступу достигается путём использования алгоритмов шифрования. Предлагаемые автором подходы имеют существенные недостатки. Система резервного копирования требует большого количества дополнительных вычислительных ресурсов и ресурсов памяти, а также обеспечения нового объекта защиты (ресурса с резервной копией). Эффективность используемых алгоритмов шифрования снижается в связи с наличием проблемы распределения ключей: необходимо предусмотреть возможность передачи ключа от клиента на сервер по защищенному каналу связи. Последствием компрометации ключа шифрования является потеря доступа к конфиденциальным данным [17].

В работе [15] Кривошеева Д.А. выделяет основные недостатки использования ассиметричных систем шифрования в медицинских облачных платформах: большие затраты вычислительных ресурсов, а также времени, которое требуется для реализации вычислительных процессов. Автор предлагает альтернативный подход к созданию симметричного ключа шифрования, основанный на использовании физиологического сигнала пациента в качестве «физиологической» подписи. Существенным недостатком предлагаемого метода является тот факт, что физиологические сигналы (электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, электроэнцефалограмма и др.) могут изменяться в течение жизни человека. Соответственно, ключ шифрования, сформированный ранее, спустя определённое время может стать недействительным и, как следствие, доступ к персональным данным станет невозможным [16, 18].

Не менее важной проблемой предлагаемого метода видится возможность доступа к данным только со стороны их обладателя (пациента, который предоставил физиологический сигнал для формирования ключа шифрования). Таким образом, возможность получения доступа к результатам обследования другими лицами (например, лечащим доктором, родственниками пациента, аналитиком системы здравоохранения и др.) затрудняется или вовсе исключается.

Подводя итоги, стоит отметить, что в работах, доступных в открытом доступе в научной литературе и электронных библиотеках, имеются различные недостатки, основными из которых являются: проблема распределения ключей, высокие требования к вычислительным ресурсам, ресурсам времени и памяти. Предлагаемый в рамках работы подход направлен на исключение указанных выше недостатков

ков за счет применения систем полностью гомоморфного шифрования, ключевой особенностью которых является возможность реализации обработки зашифрованной информации без её расшифровки [20].

Гомоморфное шифрование: определение, виды и библиотеки. Гомоморфное шифрование – форма шифрования, позволяющая производить определённые математические действия с зашифрованным текстом и получать зашифрованный результат, который соответствует результату операций, выполненных с открытым текстом. Например, один человек мог бы сложить два зашифрованных числа, не зная расшифрованных чисел, а затем другой человек мог бы расшифровать зашифрованную сумму – получить расшифрованную сумму, не имея расшифрованных чисел. Гомоморфное шифрование позволяет предоставлять различные услуги, не предоставляя открытые пользовательские данные для каждой услуги.

Гомоморфное шифрование является формой шифрования, позволяющей осуществить определённую алгебраическую операцию над открытым текстом посредством выполнения алгебраической операции над зашифрованным текстом.

Пусть k – ключ для шифрования, t – подлежащий шифрованию открытый текст (сообщение), $E(k, t)$ – выполняющая шифрование функция.

Функция E называется гомоморфной относительно операции $*$ (сложения или умножения) над открытыми текстами (сообщениями) t_1 и t_2 , если существует эффективный алгоритм M (требующий полиномиального числа ресурсов и работающий за полиномиальное время), который, получив на вход любую пару зашифрованных текстов вида $E(k, t_1)$ и $E(k, t_2)$, выдаёт зашифрованный текст (шифротекст) $c = M(E(k, t_1), E(k, t_2))$ такой, что при расшифровании c будет получен открытый текст $t_1 * t_2$.

Система шифрования является гомоморфной относительно операции умножения (обладает мультипликативными гомоморфными свойствами), если выполняется равенство: $D(E(t_1) \times E(t_2)) = t_1 \times t_2$.

Система шифрования является гомоморфной относительно операции сложения (обладает аддитивными гомоморфными свойствами), если выполняется равенство: $D(E(t_1) + E(t_2)) = t_1 + t_2$.

Система шифрования является гомоморфной относительно операций умножения и сложения, то есть, полностью гомоморфной (обладает и мультипликативными, и аддитивными гомоморфными свойствами), если выполняются равенства:

$$D(E(t_1) \times E(t_2)) = t_1 \times t_2;$$

$$D(E(t_1) + E(t_2)) = t_1 + t_2.$$

В настоящее время доступно множество программных реализаций систем полностью гомоморфного шифрования [20]. Некоторые из них носят экспериментальный характер и разработаны в академических целях, другие нацелены на использование широким кругом разработчиков. В рамках настоящей работы рассмотрены популярные библиотеки, предоставляющие возможности полностью гомоморфного шифрования и обладающие открытым исходным кодом:

- ◆ HELib – одна из наиболее популярных библиотек, разработана Халеви и Шупом, предоставляет возможность тонкой настройки режимов работы схем гомоморфного шифрования.

- ◆ Библиотека гомоморфного шифрования SEAL разработана исследователями Microsoft Research, поддерживает операции сложения и умножения над целыми и вещественными числами.

- ◆ Библиотека криптографических механизмов PALISADE, основанных на целочисленных решетках, в том числе систем полностью гомоморфного шифрования.

◆ Библиотека разработана авторами одноименной системы полностью гомоморфного шифрования TFHE. В отличие от HELib и SEAL, не поддерживает работу с вещественными числами.

◆ Библиотека HEAAN разработана авторами системы CKKS, предоставляет возможность выполнения гомоморфных приближенных вычислений над вещественными числами.

◆ $\Lambda \circ \lambda$ – Haskell-библиотека общего назначения, предоставляющая интерфейс для многих математических операций, используемых в криптографических механизмах, основанных на целочисленных решетках. В том числе в библиотеке реализован модифицированный вариант системы BGV.

◆ lattigo – реализация на языке Go криптографических механизмов, основанных на целочисленных решетках. Включает набор функций для программной реализации систем BFV и CKKS.

Разработка платформы медицинской информационной системы. Для решения задачи хранения, систематизации и обработки медицинских данных авторами разработана облачная платформа, общая схема которой представлена на рис. 1.

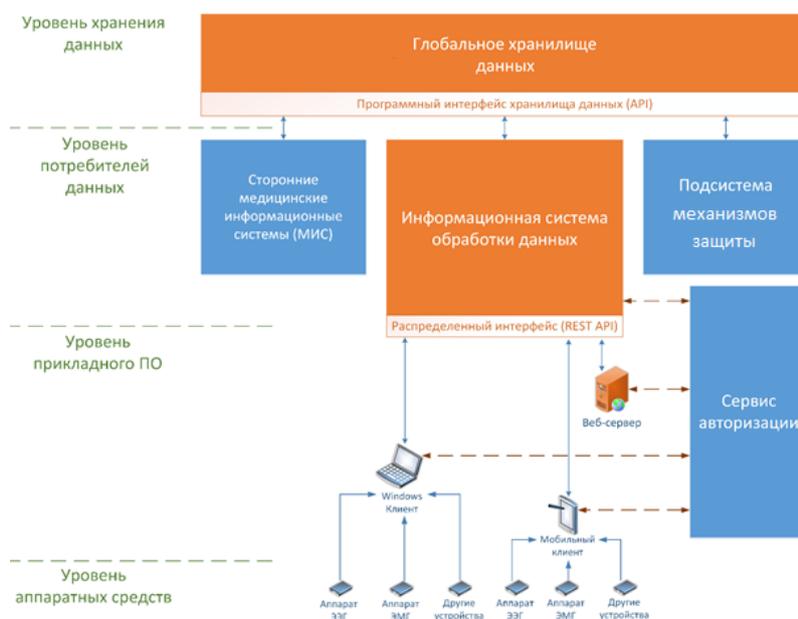


Рис. 1. Общая схема облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных

Разработанная облачная система включает 4 основных уровня:

Уровень хранения данных: глобальное хранилище данных, которое включает в себя базу данных для хранения исходных данных обследований и отчетов, а также антропометрическая, диагностическая, демографическая информация о пациентах. Хранилище содержит полный объем информации для исследований и обучения машинных алгоритмов, но идентификация пациента возможна только по защищенному идентификатору.

Уровень потребителей данных – слой, включающий системы, которые принимают и обрабатывают данные из Глобального хранилища или передают в него новые данные. Этот уровень связан с уровнем хранения данных через стандартизированный программный интерфейс (Storage API). Потребителями данных могут

быть: сторонние медицинские информационные системы; исследовательские системы; информационная система обработки данных – содержит базу персональных данных пациентов, соответствует требованиям безопасности и защиты персональных данных и медицинских данных (Федеральный закон РФ от 27 июля 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных»; Федеральный закон от 21.11.2011 N 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»; Health Insurance Portability and Accountability Act of 1996, HIPAA) [2]. Данный модуль обеспечивает взаимодействие с конечными клиентскими приложениями по средствам распределенного интерфейса (REST API).

Уровень прикладного ПО – уровень, содержащий программные средства конечных клиентов, где формируются и/или отображаются медицинские данные (обследования в виде сигналов, отчетные и персональные данные пациента): Windows клиенты – программное обеспечение для ОС семейства Windows; Веб-сервер – предоставляет пользователю возможность доступа через web browser, в соответствии с назначенными этому пользователю ролями; Мобильный клиент – предоставляет доступ в информационную систему обработки данных используя мобильные устройства (Android, iOS).

Уровень аппаратных средств – физические устройства для проведения обследований. В общем случае могут быть различных видов: электроэнцефалографы, кардиографы, системы биологической обратной связи, носимые фитнес трекеры и т.д.

Экспериментальная часть. Алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе полностью гомоморфной криптосистемы. В результате исследований разработан следующий алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных (результатов медицинских обследований на примере ЭЭГ) на основе полностью гомоморфной криптосистемы:

Предусловия алгоритма:

1. Пользователями медицинской информационной системы являются доктора и пациенты. Каждый пользователь системы зарегистрирован в ней с использованием уникального идентификатора (логин) и пароля.

2. При посещении лечебного учреждения доктор сообщает пациентам о необходимости проведения серии мониторинговых обследований (например, суточное ежедневное мониторирование мозговой активности в течение одного месяца реабилитации пациента). Для правильной постановки диагноза и выбора тактики лечения пациентов важна динамика изменения показателей и их средние значения за длительный период времени. При этом доктор предоставляет свой уникальный идентификатор пациенту, необходимый для его первичной регистрации в медицинской информационной системе.

3. При регистрации в системе пациент указывает собственные персональные данные и уникальный идентификатор доктора, назначившего серию обследований.

4. В дальнейшем в личном кабинете пользователя (на мобильном телефоне или в программе на ПК) отображается перечень докторов, работающих с данным пациентом. В личном кабинете доступна функция добавления новых докторов (для потенциального масштабирования системы и добавления новых специалистов аналогичного или другого профиля).

5. При попытке привязки уникального идентификатора доктора к личному кабинету пациента доктор получает уведомление с запросом на подтверждение данного действия. После подтверждения запроса у доктора появляются права доступа на просмотр результатов медицинских обследований конкретного пациента.

6. Сервер S, предназначенный для хранения и систематизации всех данных, содержит базу данных с правами доступа для каждого зарегистрированного доктора системы к результатам пациентов.

Шаги алгоритма:

Шаг 1. На стороне каждого доктора медицинской информационной системы для каждого из его пациентов генерируется и хранится пара ключей (открытый и секретный ключ). Генерация ключей осуществляется сразу после подтверждения запроса на привязку доктора к личному кабинету определенного пациента.

Шаг 2. После подтверждения привязки доктора к личному кабинету пациента открытый ключ доктора для конкретного пациента отправляется данному пациенту.

Шаг 3. Каждый пациент регистрирует в процессе проведения обследований (сеансов) показатели биоритмов головного мозга (альфа, бета и тета ритмы). Изменение волновой активности (по каждому из видов ритмов) представляет собой изменяющийся ряд числовых данных (обновление один раз за одну секунду).

Шаг 4. Данные (показатели ритмов мозговой активности), зарегистрированные с использованием устройства (например, беспроводное ЭЭГ-устройство) на стороне пациента (мобильное приложение), шифруются на открытом ключе, полученным от доктора. Данные в зашифрованном виде передаются и хранятся на сервере.

Шаг 5. Данные, отправленные на сервер, хранятся на нем без последующего расшифрования. Данные о значениях ритмов мозговой активности статистически накапливаются в течение определенного длительного периода времени (курса реабилитации). Параллельно осуществляется учет значения количества проведенных исследований для каждого пациента. Применение алгоритма гомоморфного шифрования позволяет проводить операцию сложения этих данных без предварительной расшифровки с целью расчета среднего значения для каждого из ритмов (по результатам серии обследований, например, в ходе курса реабилитации методом биологической обратной связи). Расчет среднего значения осуществляется в результате умножения суммарного значения каждого ритма (за серию обследований) на мультипликативное обратное для значения количества проведенных исследований.

Шаг 6. При необходимости получения расчетных данных каждого ритма (альфа, бета и тета) доктор отправляет на сервер запрос в виде идентификатора пациента на получение данных.

Шаг 7. После получения запроса на сервере проверяется наличие права доступа доктора на получение данных определенного пациента. Проверка осуществляется по идентификатору доктора.

Шаг 8. В случае наличия прав доступа сервер отправляет зашифрованные данные (средние значения ритмов мозговой активности) доктору, выполнившему запрос.

Шаг 9. Доктор расшифровывает полученные данные своим секретным ключом (сгенерированным для конкретного пациента).

Последовательность запросов и ответов (со стороны сервера, пациентов и докторов), необходимых для реализации алгоритма, схематично представлена на рис. 2.

В рамках работы реализован алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе полностью гомоморфной криптосистемы для данных мозговой активности. В качестве потенциальных претендентов на использование в качестве алгоритмов полностью гомоморфного шифрования выбраны схемы BFV и CKKS. Окончательный выбор схемы выполнен на основе результатов тестирования свойств заявленных кандидатов, полученных Бабенко М.Г., Голиблевской Е.И. и Ширяевым Е.М. и опубликованных в работе [1].

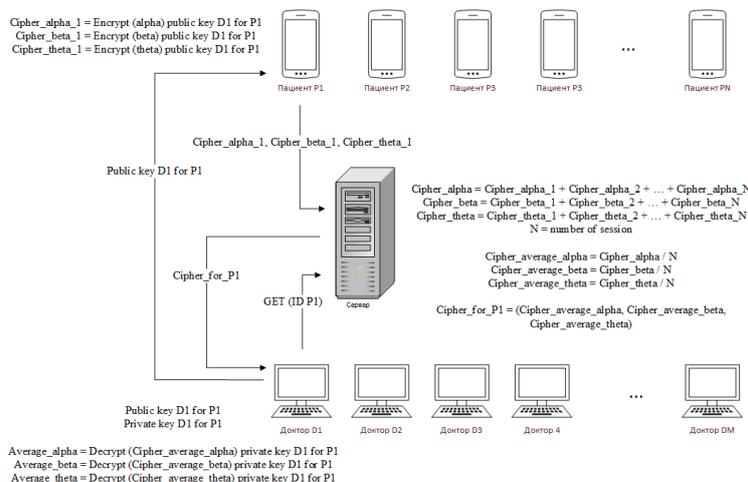


Рис. 2. Алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных (результатов медицинских обследований на примере ЭЭГ) на основе полностью гомоморфной криптосистемы

Авторами работы [1] проведен обширный анализ криптографических свойств существующих гомоморфных шифров (CKKS, BFV) на основе обучения с ошибками, выполнено сравнение их технических характеристик: криптостойкости и избыточности данных, скорости кодирования и декодирования данных, скорости выполнения арифметических операций сложения и умножения данных, скорости выполнения операции KeySwitching.

Важно отметить высокий уровень теоретической и практической значимости результатов, полученных Бабенко М.Г., Голимблевской Е.И. и Ширяевым Е.М. Полученные авторами выводы могут служить основой для исследований в различных областях и направлениях информационной безопасности: анализ безопасности криптографических протоколов, криптографические средства защиты информации, защита информации и облачных вычислений. Научные результаты авторов позволяют разрабатывать эффективные алгоритмы обеспечения информационной безопасности, обеспечивать эффективную комплексную защиту информации, циркулирующей в распределенных медицинских системах, построенных на основе современных криптографических средств, что играет важную роль в обеспечении информационной безопасности в целом.

Для исследования схем гомоморфного шифрования авторами работы [1] выбрана криптографическая библиотека на основе решеток LattiGo, разработанная на языке GoLang. Эта библиотека содержит набор функций, реализующих гомоморфные схемы шифрования BFV и CKKS. Структура LattiGo позволяет проводить различные исследования схем, экспериментировать как с полными схемами, так и с отдельными операциями, выполняемыми в этих схемах. Все схемы соответствуют общепринятым стандартам безопасности.

Для анализа эффективности предложенного в настоящей работе алгоритма авторами выполнен анализ результатов, полученных в работе [1] с точки зрения времени выполнения таких операций, как: шифрование, дешифрование, сложение, умножение, отношение сигнал шум зашифрованного текста к открытому тексту. Измерения в работе [1] проводятся для разных размерностей вектора (от 128 до 2048 чисел) и для разных параметров шифрования (ID): чем выше уровень ID, тем выше уровень обеспечиваемой безопасности данных.

Сравнение времени выполнения функции шифрования для алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схем BFV и CKKS) в зависимости от рассмотренных наборов параметров безопасности (ID) и размерности вектора данных позволяет сделать следующие выводы: обе схемы шифрования имеют примерно одинаковую скорость по первым трем наборам параметров безопасности. При наивысших требованиях к уровню безопасности, схема BFV хуже масштабируется и имеет более низкую скорость, что говорит о том, что в целом BFV значительно уступает по выполнению этой функции схеме CKKS. Данная ситуация объясняется особенностями арифметической реализации.

Сравнение времени выполнения функции расшифрования для алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схем BFV и CKKS) в зависимости от рассмотренных наборов параметров безопасности (ID) и размерности вектора данных позволяет сделать следующие выводы: обе схемы шифрования имеют сопоставимую скорость по первым двум наборам параметров безопасности. Однако при наивысших требованиях к уровню безопасности, схема BFV имеет более низкую производительность, что говорит о том, что BFV существенно уступает по выполнению этой функции схеме CKKS.

Сравнение времени выполнения функции сложения для алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схем BFV и CKKS) в зависимости от рассмотренных наборов параметров безопасности (ID) и размерности вектора данных позволяет сделать следующие выводы: изучение функции гомоморфного сложения также показывает преимущество схемы CKKS. Это связано с тем, что в схеме CKKS данные правильно масштабируются перед операцией.

Сравнение времени выполнения функции умножения для алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схем BFV и CKKS) в зависимости от рассмотренных наборов параметров безопасности (ID) и размерности вектора данных позволяет сделать следующие выводы: изучение функции гомоморфного умножения показывает преимущество схемы BFV. Это связано с тем, что схема BFV имеет скалярное умножение только для типа `uint64`, в то время как схема CKKS предоставляет решение для таких типов, как `complex128`, `float64`, `uint64`, `int64` и `int`. При умножении зашифрованного текста на типы данных `complex128`, `float64` (для CKKS) очевидно, требуется больше времени, чем при умножении на константу типа `uint64` в схеме BFV, однако этот недостаток нивелируется возможностью работы с различными типами данных.

Известно, что полученный с помощью схем полностью гомоморфного шифрования зашифрованный текст имеет избыточность. Степень этой избыточности является важным параметром схем полностью гомоморфного шифрования. Эту избыточность можно определить, исследуя отношение сигнал шум.

Сравнение отношения сигнал шум для алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схем BFV и CKKS) в зависимости от рассмотренных наборов параметров безопасности (ID) и размерности вектора данных позволяет сделать следующие выводы: при шифровании открытого текста шум в схеме CKKS увеличивается намного больше, чем в схеме BFV. Но при более высоких настройках безопасности ее увеличение уменьшается. В целом можно отметить, что при более низких настройках безопасности и большей размерности зашифрованного текста схема BFV показывает меньшую избыточность данных, но в случае высоких настроек безопасности схема CKKS явно более эффективна.

Подводя итоги, стоит отметить, что схема полностью гомоморфного шифрования CKKS наиболее эффективна, особенно в условиях критичности требований к высокому уровню безопасности конфиденциальных данных, чем обусловлен выбор данной схемы для реализации предложенного в настоящей работе алгоритма.

Заключение. Оценка эффективности разработанной облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных:

Иерархичное разделение потоков данных на уровни, стандартизация протоколов передачи данных и форматов их хранения обеспечивают создание универсальной, гибкой и надежной медицинской информационной системы. Разработанная архитектура позволяет быстро интегрироваться в существующие медицинские системы. Единое пространство для хранения данных дает возможность осуществлять исследование значительного массива классифицированной медицинской информации средствами машинного обучения.

Разработан алгоритм обеспечения безопасности медицинских данных, хранящихся в облачной платформе в электронном виде, регистрируемых при проведении обследований пациентов с целью расчета среднего значения для каждого из ритмов мозговой активности (по результатам серии обследований за длительный период времени) с использованием алгоритма полностью гомоморфного шифрования. На основе результатов работы [1] в части тестирования (анализ времени выполнения таких операций, как: шифрование, дешифрование, сложение, умножение, отношение сигнал шум зашифрованного текста к открытому тексту) из двух потенциальных претендентов на использование в качестве алгоритмов полностью гомоморфного шифрования (схемы BFV и CKKS) выбран наиболее оптимальный алгоритм. В результате показано, что схема полностью гомоморфного шифрования CKKS наиболее эффективна, особенно в условиях критичности требований к высокому уровню безопасности конфиденциальных данных, чем обусловлен выбор данной схемы для реализации предложенного в настоящей работе алгоритма.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-37-90138 Аспиранты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабенко М.Г., Голымблевская Е.И., Ширяев Е.М.* Сравнительный анализ алгоритмов гомоморфного шифрования на основе обучения с ошибками // Тр. ИСП РАН. – 2020. – № 2.
2. *Митькина П.А.* Особенности хранения медицинской информации // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 5. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/82546> (дата обращения: 07.10.2019).
3. Health Insurance Portability and Accountability Act. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Health_Insurance_Portability_and_Accountability_Act (дата обращения: 08.10.2019).
4. DICOM. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DICOM> (дата обращения 08.10.2019).
5. *L.-Y. T. a. M.-S. H. Li-Chin Huangc.* A reversible data hiding method by histogram shifting in high quality medical images // The Journals of systems and software. – 2013. – Vol. 86. – P. 716-727.
6. *M.G. a. R.D. Jessica Fridrich.* Detecting LSB Steganography in Color and Gray-Scale Images. Binghamton.
7. *N.A.H.A.-C. Fatma E.-Z. A. Elgamal.* Secure Medical Images Sharing over Cloud Computing environment // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2013. – Vol. 4. – P. 130-138. А. В. К. R. G. а. J. P. S. Digvijay Singh Chauhan, "Double Secret Key Based Medical Image Watermarking for Secure Telemedicine in Cloud Environment // in 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017.
8. Logistic map. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_map (дата обращения 08.10.2019).
9. *Abdulrahman Alsalmay.* Cloud System for Encryption and Authentication Medical Images // IOSR Journal of Computer Engineering. e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727. – Vol. 20, Issue 1, Ver. II (Jan.-Feb. 2018). – P. 65-75. –https://www.researchgate.net/publication/332571801_Cloud_System_For_Encryption_And_Authentication_Medical_Images (дата обращения: 29.09.2019).
10. *Плотников А.В., Прилуцкий Д.А., Селищев С.В.* Стандарт DICOM в компьютерных медицинских технологиях. – <https://mks.ru/library/article/1997/dicom.html> (дата обращения 08.10.2019).

11. Визуальная криптография. – URL: http://cryptowiki.net/index.php?title=%D0%92%D0%B8%D0%B7%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 08.10.2019).
12. *Котяшичев И.А., Бырылова Е.А.* Защита информации в «Облачных технологиях» как предмет национальной безопасности. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 6.4 (86.4). – С. 30-34. – URL: <https://moluch.ru/archive/86/16357/> (дата обращения: 09.06.2020).
13. *Керейтова М.Р., Малыш В.Н.* Информационная безопасность в медицинских информационных системах // НиКа. – 2012. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-bezopasnost-v-meditsinskih-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 11.06.2020).
14. *Бойченко И.В.* Построение ИТ-инфраструктуры здравоохранения на основе парадигмы облачных вычислений // Врач и информационные технологии. – 2011. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-it-infrastruktury-zdravoohraneniya-na-osnove-paradigmy-oblacznyh-vychisleniy> (дата обращения: 09.06.2020).
15. *Rohan Jathanna.* Int. Journal of Engineering Research and Application. – June 2017. – Vol. 7, Issue 6 (Part - 5). – P. 31-38. – ISSN: 2248-9622. – www.ijera.com. (дата обращения: 10.06.2020).
16. *Кривошеева Дарина.* Модель угроз безопасности в системах дистанционного мониторинга состояния человека // Правовая информатика. – 2016. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-ugroz-bezopasnosti-v-sistemah-distantsionnogo-monitoringa-sostoyaniya-cheloveka> (дата обращения: 11.06.2020).
17. *Назаренко Г.И., Михеев А.Е., Горбунов П.А., Гулиев Я.И., Фохт И.А., Фохт О.А.* Особенности решения проблем информационной безопасности в медицинских информационных системах // Врач и информационные технологии. – 2007. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-resheniya-problem-informatsionnoy-bezopasnosti-v-meditsinskih-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 16.10.2020).
18. *Горбунов П.А., Фохт И.А.* Проблемы информационной безопасности в медицинских информационных системах – теоретические решения и практические разработки // Программные системы: теория и приложения / под ред. С.М. Абрамова. В 2-х т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2006. – С. 107-112.
19. *Назаренко Г.И., Гулиев Я.И., Ермаков Д.Е.* Медицинские информационные системы: теория и практика / под ред. Г.И. Назаренко, Г.С. Осипова. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.
20. *Михеев В.А.* Основы построения подсистемы защиты информации многофункциональной информационной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 8 (85). – С. 165-167.
21. *Клепиков Е.А., Ясько А.О.* Вопросы защиты конфиденциальной медицинской информации о пациенте в медицинских информационных системах // Символ науки. – 2016. – № 9-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-zaschity-konfidentsialnoy-meditsinskoj-informatsii-o-patsiente-v-meditsinskih-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 16.10.2020).

REFERENCES

1. *Babenko M.G., Golimblevskaya E.I., SHiryayev E.M.* Sravnitel'nyy analiz algoritmov gomomorfno shifrovaniya na osnove obucheniya s oshibkami [Comparative analysis of homomorphic encryption algorithms based on learning with errors], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2020, No. 2.
2. *Mit'kina P.A.* Osobennosti khraneniya meditsinskoj informatsii [Features of storing medical information], *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovations], 2017, No. 5. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/82546> (accessed 07 October 2019).
3. Health Insurance Portability and Accountability Act. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Health_Insurance_Portability_and_Accountability_Act (accessed 08 October 2019).
4. DICOM. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DICOM> (дата обращения 08.10.2019).
5. *L.-Y. T. a. M.-S. H. Li-Chin Huangc.* A reversible data hiding method by histogram shifting in high quality medical images, *The Journals of systems and software*, 2013, Vol. 86, pp. 716-727.

6. M.G. a. R.D. Jessica Fridrich. Detecting LSB Steganography in Color and Gray-Scale Images. Binghamton.
7. N.A.H.A.-C. Fatma E.-Z. A. Elgamal. Secure Medical Images Sharing over Cloud Computing environment, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2013, Vol. 4, pp. 130-138. A. B. K. R. G. a. J. P. S. Digvijay Singh Chauhan, "Double Secret Key Based Medical Image Watermarking for Secure Telemedicine in Cloud Environment, in 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017.
8. Logistic map. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_map (accessed 08 October 2019).
9. Abdulrahman Alsalmay. Cloud System for Encryption and Authentication Medical Images, *IOSR Journal of Computer Engineering*. e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727, Vol. 20, Issue 1, Ver. II (Jan.-Feb. 2018), pp. 65-75. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332571801_Cloud_System_For_Encryption_And_Authentication_Medical_Images (accessed 29 September 2019).
10. Plotnikov A.V., Prilutskiy D.A., Selishchev S.V. Standart DICOM v komp'yuternykh meditsinskikh tekhnologiyakh [DICOM standard in computer medical technologies]. Available at: <https://mks.ru/library/article/1997/dicom.html> (data obrashcheniya 08 October 2019).
11. Vizual'naya kriptografiya [Visual cryptography]. Available at: http://cryptowiki.net/index.php?title=%D0%92%D0%B8%D0%B7%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F (accessed 08 October 2019).
12. Kotyashichev I.A., Byrylova E.A. Zashchita informatsii v «Oblachnykh tekhnologiyakh» kak predmet natsional'noy bezopasnosti [Information protection in "Cloud technologies" as a subject of national security], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2015, No. 6.4 (86.4), pp. 30-34. Available at: <https://moluch.ru/archive/86/16357/> (accessed 09 June 2020).
13. Kereytova M.R., Malysh V.N. Informatsionnaya bezopasnost' v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh [Information security in medical information systems], *NiKa* [NIK], 2012. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-bezopasnost-v-meditsinskikh-informatsionnyh-sistemah> (accessed 11 June 2020).
14. Boychenko I.V. Postroenie IT-infrastruktury zdavookhraneniya na osnove paradigmy oblachnykh vychisleniy [Building IT infrastructure for healthcare based on the paradigm of cloud computing], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technologies], 2011, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-it-infrastruktury-zdavookhraneniya-na-osnove-paradigmy-oblachnyh-vychisleniy> (accessed 09 June 2020).
15. Rohan Jathanna. Int. Journal of Engineering Research and Application, June 2017, Vol. 7, Issue 6 (Part - 5), pp. 31-38. ISSN: 2248-9622. Available at: www.ijera.com (accessed 10 June 2020).
16. Krivosheeva Darina. Model' ugroz bezopasnosti v sistemakh distantsionnogo monitoringa sostoyaniya cheloveka [Model of security threats in systems of remote monitoring of human condition], *Pravovaya informatika* [Legal informatics], 2016, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-ugroz-bezopasnosti-v-sistemah-distantsionnogo-monitoringa-sostoyaniya-cheloveka> (accessed 11 June 2020).
17. Nazarenko G.I., Mikheev A.E., Gorbunov P.A., Guliev Ya.I., Fokht I.A., Fokht O.A. Osobennosti resheniya problem informatsionnoy bezopasnosti v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh [Features of solving information security problems in medical information systems], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information Technology], 2007, No. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-resheniya-problem-informatsionnoy-bezopasnosti-v-meditsinskikh-informatsionnyh-sistemah> (accessed 16 October 2020).
18. Gorbunov P.A., Fokht I.A. Problemy informatsionnoy bezopasnosti v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh – teoreticheskie resheniya i prakticheskie razrabotki [Information security problems in medical information systems - theoretical solutions and practical developments], *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Software systems: theory and applications], ed. by S.M. Abramova. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 107-112.
19. Nazarenko G.I., Guliev Ya.I., Ermakov D.E. Meditsinskie informatsionnye sistemy: teoriya i praktika [Medical information systems: theory and practice], ed. by G.I. Nazarenko, G.S. Osipova. Moscow: Fizmatlit, 2005, 320 p.

20. *Mikheev V.A.* Osnovy postroeniya podsystemy zashchity informatsii mnogofunktsional'noy informatsionnoy sistemy [Fundamentals of building a subsystem of information security for a multifunctional information system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 8 (85), pp. 165-167.
21. *Klepikov E.A., YAs'ko A.O.* Voprosy zashchity konfidentsial'noy meditsinskoj informatsii o patsiente v meditsinskih informatsionnykh sistemakh [Issues of protecting confidential medical information about a patient in medical information systems], *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, No. 9-1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-zashchity-konfidentsialnoy-meditsinskoj-informatsii-o-patsiente-v-meditsinskih-informatsionnyh-sistemah> (accessed 16 October 2020).

Статью рекомендовал к опубликованию д.э.н., профессор Е.Н. Тищенко.

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

Шумилин Александр Сергеевич – e-mail: ashumilin@sfedu.ru; тел.: +79081773495; м.н.с.

Алексеев Дмитрий Михайлович – e-mail: dalekseev@sfedu.ru; тел.: +7951 5069532; ассистент.

Babenko Lyudmila Klimentievna – Southern Federal University; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054530191; dr. of eng. sc.; professor.

Shumilin Alexander Sergeevich – e-mail: ashumilin@sfedu.ru; phone: +79081773495; junior researcher.

Alekseev Dmitry Mikhailovich – e-mail: dalekseev@sfedu.ru; phone: +79515069532; assistant.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-134-145

С.М. Гушанский, В.Н. Пуховский, В.С. Потапов

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ДЕКОДЕРА ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КОДОВ СТАБИЛИЗАТОРА

В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Их работа основана на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание для преобразования входных данных в выходные, которые реально смогут обеспечить эффективную производительность на 3–4 порядка выше, чем любые современные вычислительные устройства, что позволит решать перечисленные выше и другие задачи в натуральном и ускоренном масштабе времени. Данная работа является исследованием влияния среды на квантовую систему кубитов и результаты ее выполнения. Разработан вероятностный декодер глубокой нейронной сети для кодов стабилизатора. Проанализированы и рассмотрены вопросы исправления ошибок для трехбитового кода без декодирования состояния. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений.

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор.

S.M. Gushanskiy, V.N. Pukhovskiy, V.S. Potapov

**IMPLEMENTATION OF A PROBABLE DEEP NEURAL NETWORK
DECODER FOR STABILIZER CODES**

Recently, there has been a rapid increase in interest in quantum computers. Their work is based on the use of quantum-mechanical phenomena such as superposition and entanglement for computing to transform input data into outputs that can actually provide effective performance 3–4 orders of magnitude higher than any modern computing devices, which will allow solving the above and other tasks in real and accelerated time scale. This work is a study of the influence of the environment on a quantum system of qubits and the results of its implementation. A probabilistic deep neural network decoder for stabilizer codes has been developed. The issues of error correction for a three-bit code without state decoding are analyzed and considered. The relevance of these studies lies in mathematical and software modeling and implementation of correction codes for correcting several types of quantum errors in the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this direction is expressed in the elimination of one of the disadvantages of the quantum computational process. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and supplementation of the field of quantum research in a number of areas.

Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator.

Введение. Реализация первого отказоустойчивого логического кубита станет важной вехой в путешествии по созданию квантового компьютера. С этой целью лаборатории в таких местах, как Google, IBM исследователи и TU Delft в настоящее время создают сверхпроводящие устройства с реализациями логического кубита с поверхностным кодом. Кубитовые архитектуры основаны на технологии ионных ловушек и квантовой оптике. Порог для поверхностного кода при реалистичных предположениях относительно шума составляет приблизительно 1 %. Современное оборудование на основе кубитов уже было продемонстрировано с коэффициентом ошибок ниже этого уровня. Однако подавление частоты логических ошибок до такой степени, что логический кубит превосходит некодированный кубит потребует таких уровней масштабируемости, которые пока невозможны в текущих экспериментах. Предполагается, что первые логические кубиты отказоустойчивого поверхностного кода потребуют решетки с более чем тысячей кубитов. Кроме того, достижение этой цели будет только первым шагом: квантовый компьютер только с одним логическим кубитом не будет мощнее, чем счеты с одной бусиной. Фактически, в настоящее время считается, что отказоустойчивый квантовый компьютер с поверхностным кодом, способным превзойти классическое устройство в полезной задаче потребует более миллиона кубитов. Первыми квантовыми протоколами для достижения отказоустойчивости, вероятно, будут коды квантового обнаружения. Как наименьший код, способный защитить от модели квантовой ошибки, код $[[4, 2, 2]]$ является перспективным кандидатом. Несколько экспериментальных реализаций кода $[[4, 2, 2]]$ уже были продемонстрированы в [1–4]. Коды с повторением (из того же семейства, что и двух- и трехкубитные коды) также были реализованы на кубитном оборудовании [5].

За последние пару лет в рамках нескольких проектов аппаратного обеспечения квантовых вычислений были разработаны облачные платформы, чтобы люди могли программировать свои устройства. Мы также должны иметь возможность выполнять операции с закодированными кубитами. Один из способов – декодировать логические кубиты, выполнить с ними операцию и затем перекодировать их. Соответственно, нам нужно уметь делать операции на логических кубитах, пока они кодируются. Дополнительно нам необходимы операции на регулярных этапах исправления ошибок, т.е. измерение синдрома и исправление. Существует 7-кубитный код, который часто используется, потому что он обладает хорошими свойствами: гейт

Адамара на логическом кубите соответствует $H^{\otimes 7}$ на физических кубитах, а CNOT между двумя логическими кубитами соответствует применению CNOT между 7 парами двух блоков физических кубитов (т.е. между 1-м кубитом одного блока и 1-м кубитом другого блока, так далее). Добавление гейт, отображающих $|b\rangle \mapsto e^{ib\pi/4}|b\rangle$ достаточно для универсальных квантовых вычислений. При разработке схем отказоустойчивых вычислений очень важно убедиться, что ошибки не распространяются слишком быстро. Рассмотрим, например, CNOT: если его контрольный бит ошибочен, то после выполнения CNOT также его целевой бит будет ошибочным. Уловка состоит в том, чтобы держать это под контролем таким образом, чтобы регулярные этапы исправления ошибок не были перегружены ошибками. Кроме того, необходимо иметь возможность безотказно готовить состояния и измерять логические кубиты.

1. Каскадные коды и пороговая теорема. Идея объединения кода с самим собой также применима к квантовым кодам. Предположим, у нас есть код (рис. 1), который кодирует один кубит в C кубитов, и допустим, что он может исправить одну ошибку на любом из своих кубитов C , и использует D временных шагов на этап исправления ошибок (каждый временной шаг может включать несколько элементарных вентилях параллельно). Предполагая, что частота ошибок p в один кубит и в один такт работы квантового вычислительного устройства, вероятность отказа кода на конкретном логическом кубите в определенное время равно

$$p' = \sum_{i=2}^{CD} \binom{CD}{i} p^i (1-p)^{CD-i}. \quad (1)$$

Если p – достаточно малая константа, то в этой сумме преобладает член для $i = 2$, и мы имеем $p' \approx (CD)^2 p^2$. Соответственно, если начальная частота ошибок p ниже некоторой магической постоянной $\approx 1/(CD)^2$, тогда $p' < p$ и, следовательно, каждый уровень исправления ошибок снижает частоту ошибок. В более общем смысле, предположим, что мы объединяем этот код k раз с самим собой. Тогда каждый логический кубит кодируется в кубиты C^k , но частота ошибок для каждого логического кубита уменьшается до $O((CDp)^{2k})$. Предположим, мы хотим иметь возможность выполнить $T = \text{poly}(n)$ тактов без ошибок на логических кубитах. Для этого нужно запустить эффективный квантовый алгоритм на неисправном квантовом оборудовании. Тогда достаточно уменьшить коэффициент ошибок до $\ll 1/T$, для которого достаточно $k=O(\log \log T)$ уровней конкатенации. Эти слои коррекции ошибок увеличивают количество кубитов и время вычислений, но это все еще лишь полилогарифмические накладные расходы. Приведенный выше набросок (при точном его воплощении) дает знаменитую «пороговую теорему» [6, 7]: если начальная частота ошибок квантового оборудования [8] может быть снижена ниже какой-то магической константы (известной как «порог отказоустойчивости»), то можем использовать программные решения, такие как квантовые коды исправления ошибок [9] и отказоустойчивые вычисления, чтобы гарантировать, что можем выполнить квантовые вычисления длительное время без серьезных ошибок. В настоящее время наиболее точные оценки порога составляют около 0,1%, но есть численные доказательства того, что даже несколько процентов могут быть терпимыми. На самом деле это один из самых важных результатов области квантовых вычислений [10], и является основным ответом скептикам: до тех пор, пока экспериментаторам удастся реализовать базовые операции в пределах нескольких процентов выявления ошибки масштабируемым образом, тогда мы сможем построить крупномасштабные квантовые компьютеры.

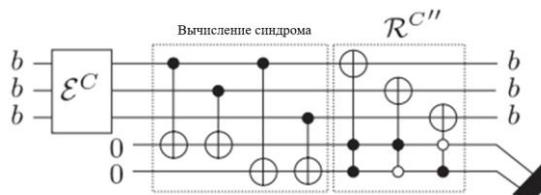


Рис. 1. Исправление ошибок для трехбитового кода без декодирования состояния

Кодовое слово $b_{enc} = bbb$ подверглось исправляемым ошибкам, что дало строку b_{enc} . В первый этап схемы вычисляется синдром ошибки на вспомогательную, а второй этап схемы [11] исправляет ошибки в b_{enc} на основе синдрома [12]. В общем, если кодируем квантовую информацию [13], подвергаем ее шуму [14] и декодируем (используя обратную операцию кодирования), то не всегда возможно восстановить исходное состояние $|\psi\rangle$. То есть в некоторых случаях

$$Tr_{anc}[U_{enc} (\sum \mathcal{E}_i^Q |\psi_{enc}\rangle \langle \psi_{enc}| \mathcal{E}_i^{Q'}) U_{enc}^\dagger] \neq |\psi\rangle \langle \psi|. \quad (2)$$

Для восстановления квантовой информации нам понадобится квантовая операция R^Q , называемая операцией восстановления [15], которая имеет эффект устранения достаточного количества шума на закодированное состояние, так что после декодирования и отслеживания анцилла [16] кубита у нас остается исходное состояние $|\psi\rangle$, как показано на рис. 2.

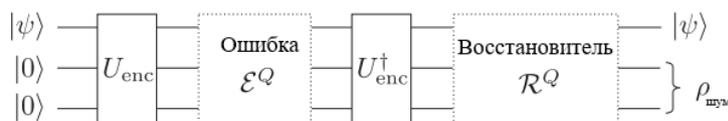


Рис. 2. Восстановление квантовой информации

В общем случае операция восстановления R^Q будет супероператором, определенным в терминах суммы по некоторым операторам R_j^Q . Для данного кода, подверженного шуму, описанному E_i^Q , определяем точность операции восстановления R на

$$F(R, C, E) = \min_{|\psi\rangle} \langle \psi | p_\psi | \psi \rangle, \quad (3)$$

где

$$p_\psi = Tr_{anc} (\sum_j R_j^Q U_e (\sum_i E_i^Q U_{enc} |\psi\rangle |00\dots 0\rangle \langle 00\dots 0| \langle \psi | U_{enc}^\dagger E_i^Q U_e R_j^Q)) \quad (4)$$

и соответствующий параметр вероятности ошибки наихудшего случая p равен $p = 1 - F(R, C, E)$. Стоит пояснить значение приведенного выше определения. Предположим какое-то состояние $|\psi\rangle$ кодируется в состояние $U|\psi\rangle|00\dots 0\rangle$, затем подвергается некоторому шуму, затем подвергается операции восстановления (соответствует операторам R_j^Q), а затем вспомогательное рабочее пространство отбрасывается, возвращая некоторое состояние p_ψ в исходном гильбертовом пространстве. Мы заинтересованы в получении насколько возможно близкому значению p к исходному состоянию $|\psi\rangle \langle \psi|$. Вероятность $p_\psi = \langle \psi | p_\psi | \psi \rangle$ следует рассматривать как вероятность от-

сутствия ошибки в закодированном состоянии. Количество $F(R, C, E)$ – это минимум всех таких вероятностей p_ψ по всем закодированным состояниям $|\psi\rangle$. Таким образом, параметр вероятности ошибки дает нам верхнюю границу вероятности, с которой общее закодированное состояние закончится в неправильном состоянии (строго говоря, его квадратный корень – это амплитуда вероятности [17], с которой произошла ошибка). Операция восстановления (рис. 3) R^Q является исправлением ошибок по отношению к набору операторов ошибок, если параметр вероятности ошибки p равен нулю, когда R^Q применяется к кодовому слову, которое было показано только этим операторам ошибок. Это означает, что

$$Tr_{anc}[\sum_j R_j^Q (U'_{enc} (\sum_i E_i^Q |\psi_{enc}\rangle \langle \psi_{enc}| E_i^Q) U_{enc}) R_j^Q] = |\psi\rangle \langle \psi|. \quad (5)$$

Один из способов думать о действии операции восстановления R^Q состоит в том, что она выталкивает весь шум во вспомогательную, так что ошибки устраняются. Операцию кодирования можно рассматривать как способ преобразование ошибок таким образом, чтобы их действие на закодированные состояния можно было исправить. Подставляя $|\psi_{enc}\rangle = U_{enc} |\psi\rangle |00\dots 0\rangle$ в выражение в левой части уравнения выше, имеем

$$\sum_j R_j^Q (U'_{enc} (\sum_i E_i^Q U_{enc} |\psi\rangle |00\dots 0\rangle \langle 00\dots 0| \langle \psi| U'_{enc} E_i^Q) U_{enc}) R_j^Q. \quad (6)$$

Можем думать об операторах $U'_{enc} E_i^Q U_{enc}$ как о преобразованных ошибках, действующий на $|\psi\rangle |00\dots 0\rangle$. Цель состоит в том, чтобы выбрать U_{enc} таким образом, чтобы поведение преобразованных ошибок позволяет нам найти операцию восстановления R^Q , которая дает нам $|\psi\rangle \langle \psi| \otimes p_{noise}$ (шум в целом будет смешанным состоянием, поэтому мы записали конечное состояние с матрицей плотности [18]). Для кода с двумя логическими кодовыми словами, применяя U_{enc} к вычислительной базе состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ создают кодовые слова $|0_{enc}\rangle$ и $|1_{enc}\rangle$ соответственно. Чтобы код был полезным, должна существовать операция восстановления R^Q , удовлетворяющая уравнению 5 как для $|0_{enc}\rangle$ так и для $|1_{enc}\rangle$. Можно показать (длительным расчетом), что для существования такого R^Q мы должны иметь

$$\langle l_{enc} | E_i^Q E_i^Q | m_{enc} \rangle = c_{ij} \delta_{lm} \quad (7)$$

для $l, m \in \{0,1\}$, где c_{ij} – константы. Уравнение 6 дает условия для квантовой коррекции ошибок.

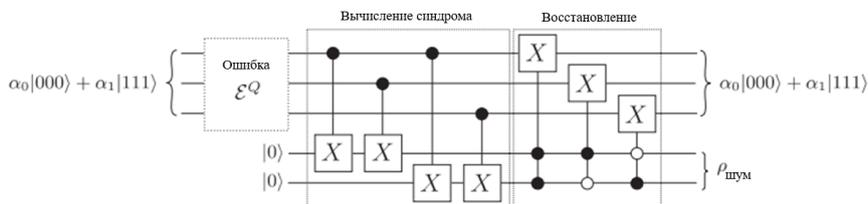


Рис. 3. Операция восстановления трехкубитового флип-кода [19] путем вычисления синдрома ошибки, а затем управление операцией восстановления

2. Реализация вероятностного декодера глубокой нейронной сети для кодов стабилизатора. Нейронные сети [20] являются особенно эффективными инструментами для аппроксимации [21] функций, где функция $f: x \rightarrow f(x)$ должна быть изучена из большого количества обучающих данных, представленных в виде пар $(x, f(x))$. Вход x устанавливается как значение входного слоя [22] нейронов. Каждый из этих нейронов через аксоны [23] связан с каждым нейроном следующего слоя. Таким образом, можно соединить вместе несколько скрытых слоев нейронов, чтобы построить более глубокую [24] нейронную сеть. Последний уровень сети – это выходной слой – его значение представляет собой изученное $f(x)$. Значение нейрона (то есть значение его активации) рассчитывается как взвешенная сумма значений активации нейронов, подключенных к нему из предыдущего слоя. Затем эта сумма передается через нелинейную функцию (называемую функцией активации). Это значение активации затем передается нейронам следующего слоя, где процесс повторяется, пока не достигнет выходного слоя. Веса в суммах (т.е. сила связей между нейронами) – это параметры, которые оптимизируются с помощью стохастического градиентного спуска, чтобы минимизировать расстояние между изученным f и \hat{f} , вычисленным на основе данных обучения. Выбор функции активации, размер скрытых слоев и размер шага для градиентного спуска [25] (также называемые гиперпараметрами) решаются заранее, до обучения. Текущие передовые практики включают выполнение случайного поиска для поиска лучших гиперпараметров.

В частном случае декодирования кода коррекции квантовой ошибки стабилизатора [26] мы хотим сопоставить синдромы с соответствующими физическими ошибками, следовательно, мы принимаем входной уровень как синдром (полученный при измерении стабилизаторов). Например, для торического кода (рис. 4) с размером решетки 9 на 9 мы должны измерить 162 входных нейронов (имеющего значение 0, если синдром тривиальный, и 1, если нет). Точно так же устанавливаем выходной уровень для предсказания того, какие физические ошибки произошли (обычно они представлены на картинке Гейзенберга, благодаря теореме Готтесмана-Книлла). Используя тот же пример, у нас есть 162 физических кубита, и нужно отслеживать их собственные значения с помощью операторов Z и X , что требует в общей сложности 324 выходных нейронов (со значением 0, если ошибок не было, и значением 1 в противном случае). Чтобы полностью определить архитектуру нейронной сети, устанавливаем для функций активации скрытых слоев значение тангенса, а для активации выходного слоя – сигмовидную функцию $\sigma(x) = (1 - e^{-x})^{-1} \in [0,1]$. Размер скрытого слоя был установлен в четыре раза больше размера входного слоя. Эти решения были приняты после исчерпывающего перебора возможных гиперпараметров, проверенных на торических кодах расстояния от 3 до 6, и оказалось, что они хорошо работают и для более крупных кодов.

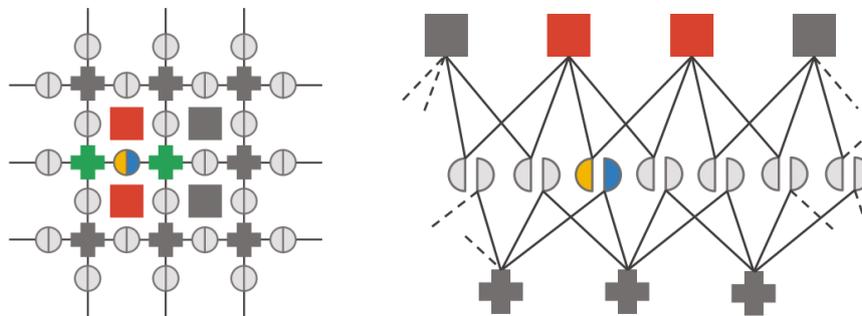


Рис. 4. Торический код квантовой коррекции ошибок

Количество скрытых слоев варьировалось более глубокие сети дают лучшее приближение вплоть до точки уменьшения отдачи около 15 слоев. Размер шага для градиентного спуска (он же скорость обучения) был отождествлен – постепенно уменьшен, чтобы позволить быстро достичь минимума. Мера расстояния между данными обучения и оценки, которая сводится к минимуму с помощью градиентного спуска – это их бинарная кроссэнтропия (мера разницы между двумя распределениями вероятностей). Обучение проводилось более одного миллиарда (синдром, ошибка) пар партиями по 512, что потребовало около суток рабочего времени графического процессора для торического кода 5 на 5. Пары генерировались на лету, сначала генерируя ошибку выборки из данной модели ошибок (этот обучающий набор также можно эффективно сгенерировать непосредственно на экспериментальном оборудовании), а затем получая соответствующий синдром с помощью скалярного произведения с матрицей проверки на четность.

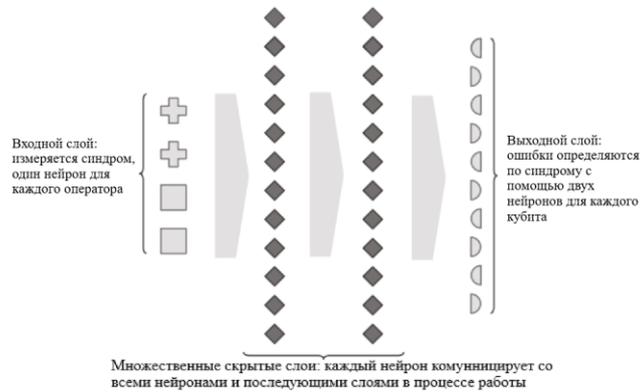


Рис. 5. Декодер нейронной сети

Модель ошибки, используемая для каждого физического кубита, представляла собой деполяризацию кубита, параметризованную точностью кубита p – вероятностью отсутствия ошибки на данном кубите или, что эквивалентно, скоростью деполяризации $1 - p$. Согласно этой модели, ошибки Z , X и Y (последовательные Z и X) имели равные вероятности $1/3(1 - p)$. Для каждого значения p обучили новую сеть, однако результаты показали некоторую устойчивость к тестированию нейронной сети с частотой ошибок, отличной от той, на которой она была обучена. Производительность сети будет улучшена, если нормализовать входные значения, чтобы получить среднее значение 0 и стандартное отклонение 1. Для коэффициента ошибок деполяризации $1 - p$ скорость, с которой изменяется собственное значение Z , составляет $p_e = \frac{2}{3}(1 - p)$. В примере торического кода скорость нетривиальных измерений стабилизатора будет одинаковой для Z и для X , а именно $p_s = 4q^3(1 - q) + 4q(1 - q)^3$, а дисперсия будет $v_s = p_s - p_s^2$. Обученная сеть может эффективно оценивать приближение функции декодирования, поэтому все, что Алисе нужно сделать, чтобы выполнить для исправления ошибок в ее квантовой памяти заключается в измерении синдрома и запуске нейронной сети для оценки синдрома. Однако нейронная сеть является непрерывной функцией и несовершенным приближением, поэтому значения в синдроме не будут дискретными нулями и единицами, а будут действительными числами от нуля до единицы. Распространенный способ использования и интерпретации этих значений – рассматривать их

как распределение вероятностей возможных ошибок, т.е. i -е значение в массиве синдрома – это действительное число от нуля до единицы, равное вероятности i -го кубита перевернуться (половина массива соответствует Z ошибкам, а половина массива соответствует X ошибкам). Эта интерпретация подкрепляется использованием бинарной кроссэнтропии в качестве цели оптимизации во время обучения. Чтобы определить, какая ошибка произошла, выбираем это распределение вероятностей. Далее проверяем правильность выборки, вычисляя синдром, который может вызвать предсказанная ошибка – если он отличается от данного синдрома, повторяем выборку. Передискретизируем только кубиты, участвующие в измерении стабилизатора, соответствующие неверным элементам синдрома (рис. 6).

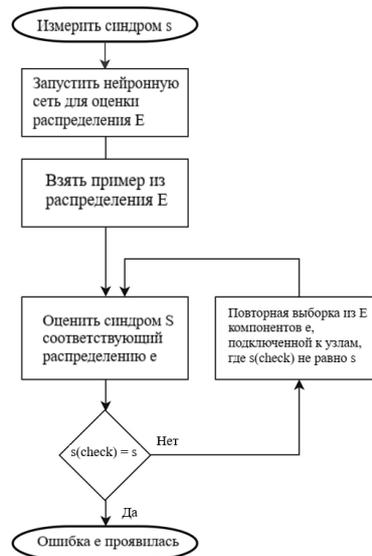


Рис. 6. Выборка нейронной сети

На первый взгляд реализация декодера (рис. 5) может выглядеть как реализация таблицы поиска, однако подчеркнем огромное сжатие данных, которого достигает нейронная сеть. Во-первых, можно рассмотреть размер самой нейронной сети. Для кода на N физических кубитов количество параметров, необходимых для описания нейронного декодера L уровней, будет $O(N^2L)$. Более того, размер обучающего набора данных для тестируемых нами кодов не превышал 10 миллиардов, и его можно уменьшить на несколько порядков, если повторно использовать образцы в стохастическом градиентном спуске (общий подход, используемый при обучении). С другой стороны, размер полной таблицы поиска будет порядка $O(4^N)$. Даже если возьмем только наиболее вероятные ошибки (и отбросим ошибки с вероятностью менее 5%), при скорости деполяризации 0,1 понадобится таблица поиска больше 1012 для торического кода с расстоянием 5 (50 кубитов), больше чем 1023 для торического кода расстояния 7 (98 кубитов) и больше 1037 для торического кода расстояния 9 (162 кубита).

Благодаря этому сжатию, прямой оптимизации для наиболее вероятной ошибки и простоте включения информации о корреляциях ошибок в процедуру декодирования, представленный здесь алгоритм является одним из лучших вариантов для декодирования кодов стабилизатора менее 200 кубитов. Из-за вероятно-

стного характера выборки декодер становится практически неэффективным для кодов размером более примерно 200 кубитов. Это можно отнести к двум характеристикам алгоритма: используем простую передачу сообщений с жестким решением, алгоритм в выборке вместо более продвинутого алгоритма распространения убеждений, засеянного выходными данными нейронной сети. Кроме того, нейронная сеть изучает только предельные вероятности ошибок на каждом кубите, не обеспечивая корреляции между этими ошибками. Более продвинутая нейронная сеть могла бы решить эту проблему, предоставив корреляционную информацию на своем выходном уровне.

На рис. 7 пунктирными линиями показаны характеристики декодера для тех же кодов, что и для эталона. Коды на расстоянии до 9 (содержащие 162 физических кубитов) практичны, но расширение использования декодера для кодов с более чем 242 физическими кубитами было бы недопустимо из-за накладных расходов на выборку. Оценки проводились для скорости деполяризации 10% физических кубитов.

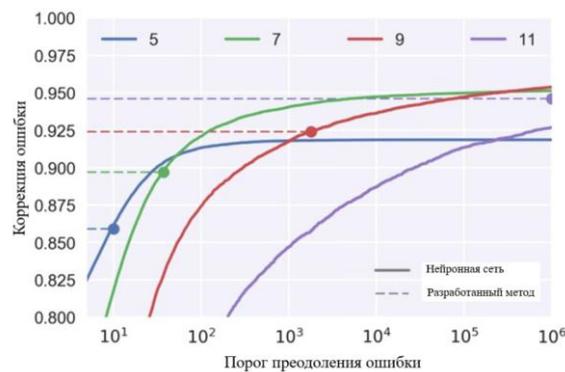


Рис. 7. Накладные расходы на выборку в зависимости от производительности декодера. На графике представлена производительность декодера, обученного на торических кодах разных расстояний по максимально допустимому количеству итераций

Хотя этот декодер является общим и может применяться к любому коду стабилизатора, можно также разработать архитектуру нейронных сетей, которые специально используют решетчатую структуру и трансляционную симметрию торического кода. Например, сверточные нейронные сети хорошо адаптированы для обработки 2D-данных. Более того, благодаря трансляционной симметрии можно представить себе декодер, который обучается на фиксированном фрагменте кода, и его можно использовать для торических кодов любого размера.

Заключение. В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что идея квантового компьютера была высказана еще Р. Фейнманом в 1982 г. До сих пор проводятся научные исследования по этой тематике. Исправление ошибок – одна из основных задач, стоящих перед квантовыми вычислительными устройствами. И без решения данной проблемы, дальнейшие успешные разработки в этой многообещающей области станут неэффективными. В данной работе численно смоделированы коды коррекции различных видов ошибок. Проанализированы основные препятствия и трудности на пути защиты канала от шума, а также предложены некоторые методы их преодоления. Произведена реализация схем исправления основных типов квантовых ошибок.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00916.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Calderbank A.R., Shor P.W.* Good quantum error-correcting codes exist // *Phys Rev A.* – 1996. – Vol. 54. – P. 1098-1106.
2. *Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al.* Fault-tolerant quantum error detection // *Science Advances.* – 2017. – 3 (10): e1701074. Available from: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. *Vuillot C.* Is error detection helpful on IBM 5q chips? // *Quantum Information and Computation.* – 2018. – Vol. 18, No. 11-12. – P. 0949-0964.
4. *Harper R., Flammia S.T.* Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience // *Phys Rev Lett.* – 2019. – 122:080504. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. *Wootton J.R., Loss D.* Repetition code of 15 qubits // *Physical Review A.* – 2018. – Vol. 97 (5). Available from: <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. *Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al.* Simulated quantum computation of molecular energies // *Science.* – 2005. – Vol. 309 (5741). – P. 1704-1707. Available from: <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.
7. *Knill M., Laflamme R., and Zurek W.* Threshold accuracy for quantum computation. – *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. *Гушанский С.М., Потапов В.С.* Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // *Информатизация и связь.* – 2017. – № 3. – С. 101-104.
9. *Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С.* Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2017. – № 6 (191). – С. 223-233.
10. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потапов В.С.* Количественные характеристики степени запутанности // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2016. – № 3 (176). – С. 76-86.
11. *Kleppner D., Kolenkow R.* *An Introduction to Mechanics (Second ed.).* – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
12. *Потапов В.С., Гушанский С.М.* Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // *Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТCSAnУ-2016.* – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.
13. *Gushansky S., Pykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V.* Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors // *The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic.* – P. 64-73.
14. *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.
15. *Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V.* Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties // *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016.* – P. 20-26;
16. *Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V.* Models of a quantum computer, their characteristics and analysis // *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT).* – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. – P. 583-587.
17. *Collier D.* The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II.* pp. 105-119: American Science Association. – Washington, DC, 1993.
18. *Olukotun K.* *Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency.* Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. *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.* – 2007. – Vol. 176. – P. 121-136.
20. *Williams C.P.* *Explorations in Quantum Computing.* Texts in Computer Science, Chapter 2. Quantum Gates, Springer, 2011. – P. 51-122.
21. *Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M.* The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation // In: *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems.* *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – Springer, 2019. – Vol. 763. – P. 198-207.

22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2002. – Vol. 48. – P. 2637-2655.
23. Milner R.G. A Short History of Spin. In: Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. – arXiv:1311.5016 (2013).
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // In: Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA. IEEE, 2000. – P. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In: Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
26. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // In: Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.

REFERENCES

1. Calderbank A.R., Shor P.W. Good quantum error-correcting codes exist, *Phys Rev A*, 1996, Vol. 54, pp. 1098-1106.
2. Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al. Fault-tolerant quantum error detection, *Science Advances*, 2017, 3 (10): e1701074. Available from: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. Vuillot C. Is error detection helpful on IBM 5q chips?, *Quantum Information and Computation*, 2018, Vol. 18, No. 11-12, pp. 0949-0964.
4. Harper R., Flammia S.T. Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience, *Phys Rev Lett.*, 2019. 122:080504. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. Wootton J.R., Loss D. Repetition code of 15 qubits, *Physical Review A*, 2018, Vol. 97 (5). Available from: <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al. Simulated quantum computation of molecular energies, *Science*, 2005, Vol. 309 (5741), pp. 1704-1707. Available from: <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.
7. Knill M., Laflamme R., and Zurek W. Threshold accuracy for quantum computation. *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methodology of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
9. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 223-233.
10. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Kolichestvennyye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 76-86.
11. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
12. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of error on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSAiU-2016* [Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, postgraduates and students of ITSAiU-2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.
13. Gushanskiy S., Pykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V. Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors, *The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic*, pp. 64-73.
14. 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*, pp. 515.

15. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties, *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016*, pp. 20-26;
16. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Models of a quantum computer, their characteristics and analysis, *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, pp. 583-587.
17. Collier D. The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II*. pp. 105-119: American Science Association. Washington, DC, 1993.
18. Olukotun K. *Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency*. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. 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*, 2007, Vol. 176, pp. 121-136.
20. Williams C.P. *Explorations in Quantum Computing*. Texts in Computer Science, Chapter 2. Quantum Gates, Springer, 2011, pp. 51-122.
21. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, *In: Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2019, Vol. 763, pp. 198-207.
22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 2637-2655.
23. Milner R.G. A Short History of Spin. In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. arXiv:1311.5016 (2013).
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *In: Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA. IEEE, 2000*, pp. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In: Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
26. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // *In: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Божич.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет, e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Пуховский Валерий Николаевич – e-mail: vpuhovskiy@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Потанов Виктор Сергеевич – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; 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.

Pukhovskiy Valery Nikolaevich – e-mail: vpuhovskiy@sfedu.ru; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; the department of computer engineering; assistant.

В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев

АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗОВ

Распознавание определенных образов в видеоизображениях, снятой камерой, осуществляется с помощью методов обучения на основе сверточных нейронных сетей. Чем больше количество образов с множеством признаков и разнообразнее обучающая выборка видеоизображений, тем лучше сверточные нейронные сети извлекают признаки из последовательности видеоизображений, которые не были включены в обучающую выборку. Это является следствием повышения точности обнаружения визуальных образов на видеоизображениях, содержащих признаки целевых образов. Однако, существуют ограничения в улучшении характеристик обнаружения, когда размеры образа, который нужно обнаружить, значительно меньше, чем область фона или, когда образ описан малым количеством информации. Для решения проблем подобного рода авторами статьи разработан алгоритм пространственно-временного комплексирования информации о движении динамических образов. Алгоритм обрабатывает фиксированное количество видеоизображений в определенные моменты времени и извлекает новые независимые признаки движения динамических образов на основе пространственно-временной обработки видеоизображений. Далее объединяет новые локальные признаки движения с исходными признаками видеоизображения. Это позволяет добавить признак движения динамических образов с сохранением исходных признаков изображения, описывающих статичные образы. Области видеоизображения, характеризующие признак движения, отображаются «цветным» кластером. Применение предварительной обработки направлено на повышение точности обнаружения образов при условии наличия динамических визуальных образов на статичном заднем фоне. Если камера работает в режиме сканирования, то статичный задний фон можно обеспечить стабилизатором видеоизображений. Экспериментальным путем получены оценки интегральных критериев точности детекционных нейросетевых алгоритмов, показывающие увеличение в точности обнаружения визуальных образов с применением алгоритма пространственно-временного комплексирования информации о движении.

Образ; распознавание образов; сверточные нейронные сети; обработка видеоизображений.

V.V. Kovalev, N.E. Sergeev

ALGORITHM FOR PRE-PROCESSING VIDEO IMAGES TO INCREASE THE ACCURACY OF SMALL OBJECT DETECTION

Recognition of certain patterns in video images captured by a camera is carried out using training methods based on convolutional neural networks. The larger the number of images with multiple features and the more diverse the training sample of video images, the better the convolutional neural networks extract features from the sequence of video images that were not included in the training sample. This is a consequence of increasing the accuracy of detecting visual images on video images containing features of target images. However, there are limitations in improving the detection performance when the size of the image to be detected is much smaller than the background area, or when the image is described with little information. To solve problems of this kind, the authors of the article have developed an algorithm for the spatio-temporal integration of information about the movement of dynamic images. The algorithm processes a fixed number of video images at certain points in time and extracts new independent signs of motion of dynamic images based on space-time processing of video images. Further, it combines new local motion features with the original video image features. This allows you to add a motion feature of dynamic images while preserving the original image features that describe static images. Areas of the video image that characterize the motion feature are displayed in a «color» cluster. The use of pre-processing is aimed at improv-

ing the accuracy of pattern detection, provided there are dynamic visual images on a static background. If the camera is in scan mode, a static background can be provided with a video stabilizer. Experimentally, estimates of integral criteria for the accuracy of detection neural network algorithms have been obtained, showing an increase in the accuracy of detecting visual images using the algorithm for spatial-temporal integration of motion information.

Pattern; pattern recognition; convolutional neural networks; image processing.

Введение. Проблема обнаружения визуальных образов в потоке видеоизображений является актуальной в последнее время. Это связано с автоматизацией процессов, которые до сих пор выполняет человек. Нейросетевые алгоритмы, основанные на операции «свертка», показали лучшие результаты в решении этой проблемы [1]. Сверточные нейронные сети относятся к алгоритмам обучения с учителем, которые в процессе обучения подбирают весовые коэффициенты фильтров, минимизируя функцию ошибки методом обратного распространения. Это позволяет подобрать весовые коэффициенты фильтров так, чтобы количество извлеченной информации хватало для принятия верного решения. Чем больше количество извлеченной информации, описывающей конкретный образ, тем больше уверенность решения [2–4]. Однако, на практике не всегда получается извлечь достаточное количество информации для принятия верного решения. Для решения проблем подобного рода специалисты в области распознавания визуальных образов используют алгоритмы предварительной обработки видеоизображений. Большая часть алгоритмов направлена на фильтрацию шумов, фильтрацию аномальных выбросов, улучшения качества видеоизображений и т.д. При этом признаки целевых образов остаются без значительных изменений.

Для устранения данного недостатка авторами статьи разработан алгоритм предварительной обработки видеоизображений, комплексизирующий локальный признак движения динамических образов с исходными признаками видеоизображения [5], на основе пространственно-временной обработки видеоизображений для статичного заднего фона, увеличивающий точность обнаружения, а также сравнение разработанного алгоритма на основе интегральной метрики точности обнаружения визуальных образов.

Описание алгоритма обнаружения образов. Авторами статьи предложен алгоритм обнаружения образов, который можно представить структурной схемой приведенной на рис. 1.

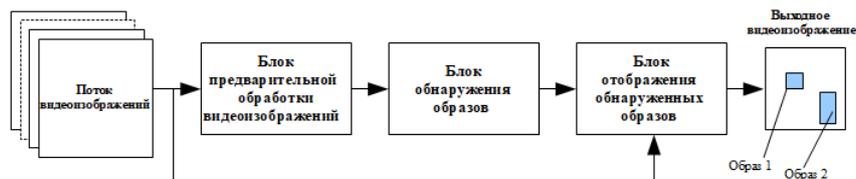


Рис. 1. Структурная схема алгоритма обнаружения образов

Последовательное во времени видеоизображение поступает на «Блок предварительной обработки видеоизображений», где происходит преобразование исходных признаков видеоизображения в новые более информативные [1, 6]. Каждое исходное видеоизображение является реальным видеоизображением в инфракрасном (ИК) оптическом диапазоне, которое можно описать трехмерной функцией $f(x, y, t_0)$, где x и y – пространственные координаты видеоизображения в фиксированный момент времени t_0 , а f называется интенсивностью, яркостью видеоизображения в точке с этими координатами, которая является признаком видео-

изображения [7]. ИК оптический диапазон является невидимым для человеческих глаз, потому что волновой диапазон ИК излучения находится выше видимого излучения. ИК излучение является тепловым излучением, а приборы, фиксирующие данный вид излучения, называются тепловизорами. Результат детектирования тепловизора является инфракрасная термограмма или тепловое видеоизображение, которое отображает картину распределения температурных полей.

В исследовании используется обучающая выборка в количестве 20000 видеоизображений, включающая в себя как статичные, так и динамичные образы интереса, принадлежащие к одной из трех категорий классов: легковой автомобиль, грузовой автомобиль и человек на статичном заднем фоне. Размеры образов в обучающей выборке видеоизображений являются мелкими по сравнению с разрешением видеоизображения, которое составляет 640 на 480 элементов яркости.

«Блок предварительной обработки видеоизображений» (рис. 1) включает в себя алгоритм обработки видеоизображений, способствующий увеличению точности обнаружения образов. Согласно авторам [6] методы и алгоритмы предварительной обработки можно разделить на три категории:

1. Уменьшение шума, порождаемого в процессе формирования, измерения и передачи образа. Для этого можно использовать методы пространственной фильтрации видеоизображений: усредняющий фильтр, фильтры, основанные на порядковых статистиках, адаптивные фильтры. Подробное описание приведенных методов фильтрации рассмотрено авторами [9, 10].

2. Глобальные преобразования, в процессе которых все входные значения используются для определения каждого выходного значения. Для осуществления этого рода преобразования часто используют различные разложения, результатом которых является набор коэффициентов [9, 10].

3. Локальные преобразования, в процессе которых лишь небольшое количество входных значений, характеризующихся временной или пространственной близостью, объединяются для «одновременной» обработки. Локальными преобразованиями видеоизображений могут являться: метод контурного анализа, сегментация, разделение по порогу, разностные методы и т.д. [10, 11].

Обработанное видеоизображение поступает на «Блок обнаружения образов», который представляет собой детекционную сверточную нейронную сеть (СНС) «You only look once v3» (YOLOv3). Подробное описание архитектуры сети YOLOv3 рассмотрено авторами статьи [12]. СНС являются современными алгоритмами, относящимися к парадигме алгоритмов второго подхода [8], которые подразумевают заданное разработчиком решающее правило. Требуется найти систему признаков, которая обеспечивала бы необходимое количество извлечения информации при минимальных вычислительных затратах. Главная особенность СНС заключается в том, что до процесса обучения разработчиком задается архитектура сети со случайно инициализированными импульсными характеристиками (ядрами) фильтров, которые подбираются в процессе обучения, методом обратного распространения так, чтобы минимизировать функцию ошибки [13, 14].

Результатом решения СНС: есть список детекций, каждая из которых содержит класс обнаруженного образа, уверенность решения и область расположения образа на видеоизображении. После чего полученные детекции отображаются на исходном видеоизображении в «Блоке отображения образов». На рис. 2 приведен пример типового ИК видеоизображения на выходе «Блока отображения образов».

Далее рассмотрим алгоритм, который реализован в «Блоке предварительной обработки видеоизображений» (рис. 1).



Рис. 2. Типовое ИК видеоизображение на выходе «Блока отображения обнаруженных образов»

Алгоритм комплексирования информации о движении. Алгоритм преобразует существующие признаки видеоизображений в заданные моменты времени t_0, t_1, \dots, t_n [1, 6] для выделения новых независимых признаков. Это достигается на основе пространственно-временной обработки последовательности видеоизображений, которая выделяет локальные области на видеоизображении, характеризующие признак движения динамических образов. После чего полученные признаки комплексуются с исходными признаками видеоизображения, что позволяет сохранить признаки статичных образов. На рис. 3 приведена структурная схема, отображающая принцип работы алгоритма.

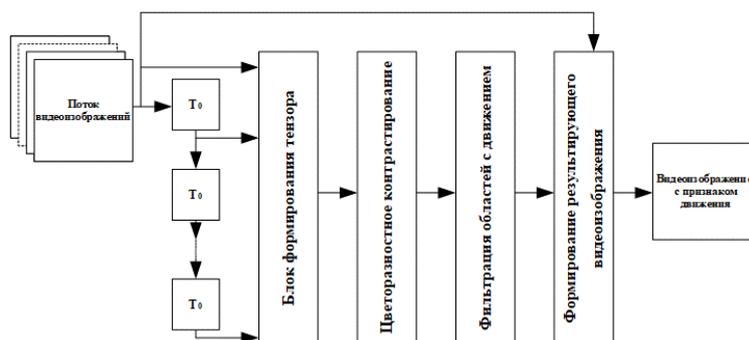


Рис. 3. Структурная схема алгоритма комплексирования информации о движении, где T_0 – временная задержка поступающего видеоизображения

На вход алгоритма поступает статичное видеоизображение, где последовательно накапливается в линии задержки с отводами, формирующими многомерную матрицу, тензор видеоизображений в «блоке формирования тензора» (рис. 4). Далее сформированный тензор проходит через цветоразностное контрастирование, которое включает в себя разность видеоизображений с логарифмическим преобразованием [15, 16]. Результатом данного преобразования являются кластеры движения, которые далее фильтруются по пороговому значению. Конечным результатом является текущее видеоизображение с «цветными» областями, характеризующими движение динамических образов. На рис. 4,а,б отображены типовые ИК видеоизображения на входе и выходе алгоритма, из которых видно, что подвижные образы выделяются цветным кластером.

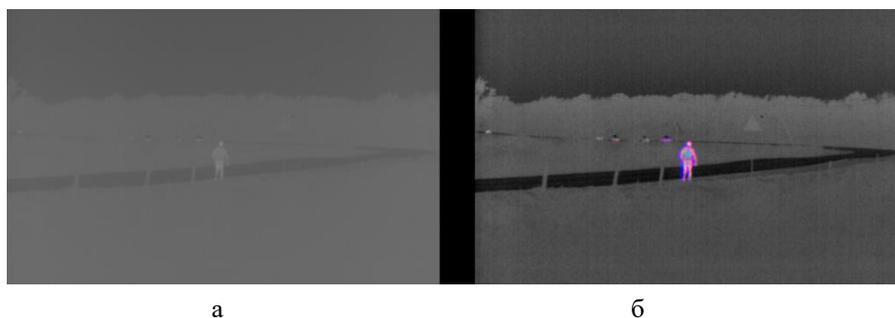


Рис. 4. Типовые ИК видеоизображения для алгоритма цветоразностного контрастирования: а – на входе, б – выходе

К особенностям данного алгоритма следует отнести работу со статичным потоком видеоизображений, а также формирование признака движения при наличии динамических образов на видеоизображении. Если тепловизионная камера работает в режиме сканирования, то статичность кадров можно обеспечить стабилизатором видеоизображений [17].

Сравнение и оценка точности разработанных алгоритмов. В данном разделе производится оценка двух детекционных моделей СНС YOLOv3, обученных на выборках видеоизображений: исходной и предварительно обработанной алгоритмом комплексирования информации о движении.

В качестве интегрального критерия точности обнаружения (локализации и классификации образа) используется метрика Mean Average Precision (mAP), которая рассчитывается как среднее между средней точностью обнаружения Average Precision (AP) каждого класса [18]. Следует отметить, что в состязательном соревновании алгоритмов обнаружения образов «COCO» [19] лучший алгоритм [20] на сегодняшний момент достигает точности 58,7 по критерию mAP.

Оценка точности обученных моделей производилась на генеральной выборке видеоизображений [21–23]. Генеральная выборка получена из обучающей выборки путем различных преобразований, минимизируя взаимосвязь признаков, описывающих видеоизображения. Список используемых преобразований включает: изменение значений динамического диапазона элементов яркости видеоизображения, изменение среднего значения элементов яркости видеоизображения, изменение разрешения видеоизображения. В табл. 1 отображены точности AP и mAP, рассчитанные на генеральной выборке видеоизображений для двух моделей СНС.

Таблица 1

Модель сверточной нейронной сети	Average Precision			Mean Average Precision
	Легковой автомобиль	Грузовой автомобиль	Человек	
Без предварительной обработки	0,58	0,49	0,26	0,44
Алгоритм комплексирования информации о движении	0,68	0,53	0,33	0,51

Сравнение интегральных оценок точности алгоритмов обнаружения показало, что лучшую точность 0,51 обеспечивает модель СНС, обученная на выборке видеоизображений, предварительно обработанной алгоритмом комплексирования информации о движении в то время, как модель СНС, обученная на исходной выборке видеоизображений, достигла 0.45 в точности обнаружения. Эти результаты показывают, что нейросетевой алгоритм обучился извлекать новые признаки образов, как следствие, повысил точности обнаружения.

На рис. 5,а,б приведены ИК видеоизображения с отображенными детекциями для моделей СНС, обученных на исходных видеоизображениях и видеоизображениях с комплексированием информации о движении. На видеоизображениях присутствует динамический образ класса «человек», однако, только модель СНС, обученная на видеоизображениях, обработанных алгоритмом комплексирования информации о движении, выдает верное решение (зеленый обрамляющий прямоугольник).



Рис. 5. Модель СНС, обученная на: а – исходных видеоизображениях, б – видеоизображениях, обработанных алгоритмом комплексирования информации о движении

Заключение. Обнаружение визуальных образов в последовательности видеоизображения является не тривиальной задачей в области компьютерного зрения. В ряде случаев это связано с количеством и качеством информации, описывающей образ интереса. Для устранения данного недостатка авторами статьи разработан алгоритм предварительной обработки видеоизображений, увеличивающий количество информации, описывающей динамические образы с сохранением исходных признаков видеоизображения как следствие увеличения точности алгоритмов обнаружения образов. Это достигается комплексированием информации о движении динамических образов с исходными признаками видеоизображения. Предварительная обработка видеоизображений основывается на пространственно-временном анализе видеоизображений в фиксированные моменты времени. При этом условия формирования нового признака движения основываются на последовательности видеоизображений со статичным фоном и присутствием динамических образов.

В качестве алгоритма обнаружения образов используется детекционная сверточная нейронная сеть YOLOv3. Оценка влияния разработанного алгоритма на точность обнаружения визуальных образов осуществлялась сравнением интегральных метрик точности обнаружения образов детекционных моделей сверточных нейронных сетей, обученных на исходной выборке видеоизображений и обработанной алгоритмом комплексирования информации о движении. Сравнение обученных моделей осуществлялось на генеральной выборке видеоизображений по критерию Mean

Average Precision, которое показало, что модель, обученная на выборке видеоизображений, обработанных алгоритмом комплексирования информации о движении, позволяет достичь точности 0,51 в то время, как модель, обученная на исходной выборке, достигает точности 0,44. Эти результаты доказывают влияние предварительной обработки на повышение точности алгоритмов обнаружения образов. Дальнейшие исследования будут направлены на усовершенствование алгоритма комплексирования информации о движении, добавлением средств сопровождения подвижных образов, а также определением направления вектора движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Aurelien G.* Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. – O'Reilly Media, 2017. – 572 p.
2. *Вапник В.Н., Червоненкис А.Я.* Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения). – М.: Наука, 1979. – 416 с.
3. *Сенин А.Г.* Распознавание случайных сигналов. – Новосибирск: Наука, 1974. – 76 с.
4. *Аркадьев А.Г., Браверман Э.М.* Обучение машины распознаванию образов. – М.: Изд-во «Наука», 1964.
5. *Васильев В.И.* Распознающие системы. – Киев: Наукова думка, 1983. – 422 с.
6. *Верхаген К., Дейн Р., Грун Ф. и [др].* Распознавание образов. Состояние и перспективы. – М.: Радио и связь, 1985. – 104 с.
7. *Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И.* Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
8. *Загоруйко Н.Г.* Классификация задач распознавания образов // Вычислительные системы. – Вып. 22. – Новосибирск, 1966.
9. *Гансалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1012 с.
10. *Фисенко В., Фисенко Т.* Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 192 с.
11. *Redmon J., Farhadi A.* YOLOv3: An Incremental Improvement // arXiv, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
12. *Brkic K.* An overview of traffic sign detection methods // Zagreb: Department of Electronics, Microelectronics, Computer and Intelligent Systems, Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2010. – 9 p.
13. *Dumoulin V., Visin F.* A guide to convolution arithmetic for deep learning // arXiv, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1603.07285v2>.
14. *LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D.* Backpropagation applied to handwritten zip code recognition // Neural Computation. – 1989. – 1:4. – P. 541-551.
15. *Rashid M., Vinu T.* A Background Foreground Competitive Model for Background Subtraction in Dynamic Background // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 25. – P. 536-543.
16. *Zivkovic Z.* Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Pattern recognition. ICPR 2004. IEEE. – 2004. – Vol. 2. – P. 28-31.
17. *Буряченко В.* Методы стабилизации видеопоследовательностей сложных статических и динамических сцен в системах видеонаблюдения: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Красноярск, 2014. – С. 23-24.
18. *Van Etten A.* Satellite imagery multiscale rapid detection with windowed networks // In 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE. – P. 735-743).
19. *Ze L., Yutong L., Yue C.* Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows // arXiv, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2103.14030>.
20. *Tsung-Yi L., Michael M., Serge B.* Microsoft COCO: Common Objects in Context // arXiv, 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1405.0312>.
21. *Shorten C., Khoshgoftaar T.* A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // J Big Data. – 2019. – 6: 60.
22. The Effectiveness of Data Augmentation in Image Classification using Deep Learning.
23. *Wang J., Perez L.* The Effectiveness of Data Augmentation in Image Classification using Deep Learning // arXiv, 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1712.04621v1>.

REFERENCES

1. *Aurelien G.* Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. O'Reilly Media, 2017, 572 p.
2. *Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya.* Teoriya raspoznavaniya obrazov (statisticheskie problemy obucheniya) [Pattern recognition theory (statistical learning problems)]. Moscow: Nauka, 1979, 416 p.
3. *Senin A.G.* Raspoznavanie sluchaynykh signalov [Recognition of random signals]. Novosibirsk: Nauka, 1974, 76 p.
4. *Arkad'ev A.G., Braverman E.M.* Obuchenie mashiny raspoznavaniyu obrazov [Learning a machine for pattern recognition]. Moscow: Izd-vo «Nauka», 1964.
5. *Vasil'ev V.I.* Raspoznavayushchie sistemy [Recognition systems]. Kiev: Naukova dumka, 1983, 422 p.
6. *Verkhagen K., Deyn R., Grun F. i [dr].* Raspoznavanie obrazov. Sostoyanie i perspektivy [Pattern Recognition. State and prospects]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 104 p.
7. *Alpatov B.A., Babayan P.V., Balashov O.E., Stepashkin A.I.* Metody avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob'ektov. Obrabotka izobrazheniy i upravlenie [Methods for automatic detection and tracking of objects. Image processing and control]. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 176 p.
8. *Zagoruyko N.G.* Klassifikatsiya zadach raspoznavaniya obrazov [Classification of pattern recognition problems], *Vychislitel'nye sistemy* [Computing systems], Issue 22. Novosibirsk, 1966.
9. *Gansales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1012 p.
10. *Fisenko V., Fisenko T.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy: ucheb. posobie [Computer processing and image recognition: textbook]. Saint Petersburg SPbGUITMO, 2008, 192 p.
11. *Redmon J., Farhadi A.* YOLOv3: An Incremental Improvement, *arXiv*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
12. *Brkic K.* An overview of traffic sign detection methods, *Zagreb: Department of Electronics, Microelectronics, Computer and Intelligent Systems, Faculty of Electrical Engineering and Computing*, 2010, 9 p.
13. *Dumoulin V., Visin F.* A guide to convolution arithmetic for deep learning, *arXiv*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1603.07285v2>.
14. *LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D.* Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, *Neural Computation*, 1989, 1:4, pp. 541-551.
15. *Rashid M., Vinu T.* A Background Foreground Competitive Model for Background Subtraction in Dynamic Background, *Procedia Technology*, 2016, Vol. 25, pp. 536-543.
16. *Zivkovic Z.* Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction, *Proc. of the 17th Intern. Conf. on Pattern recognition. ICPR 2004. IEEE*, 2004, Vol. 2, pp. 28-31.
17. *Buryachenko V.* Metody stabilizatsii videoposledovatel'nostey slozhnykh staticheskikh i dinamicheskikh stsen v sistemakh videonablyudeniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Methods of stabilization of video sequences of complex static and dynamic scenes in video surveillance systems: abstract cand. of eng. sc, diss.]. Krasnoyarsk, 2014, pp. 23-24.
18. *Van Etten A.* Satellite imagery multiscale rapid detection with windowed networks, *In 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE*, pp. 735-743.
19. *Ze L., Yutong L., Yue C.* Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows, *arXiv*, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2103.14030>.
20. *Tsung-Yi L., Michael M., Serge B.* Microsoft COCO: Common Objects in Context. *arXiv*, 2015, Available at: <https://arxiv.org/abs/1405.0312>.
21. *Shorten C., Khoshgoftaar T.* A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning, *J Big Data*, 2019, 6: 60.
22. The Effectiveness of Data Augmentation in Image Classification using Deep Learning.
23. *Wang J., Perez L.* The Effectiveness of Data Augmentation in Image Classification using Deep Learning, *arXiv*, 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1712.04621v1>.

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

Ковалев Владислав Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525864492; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Сергеев Николай Евгеньевич – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; тел.: +79281742585; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Kovalev Vladislav Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525864492; the department of computer science; post-graduate student.

Sergeev Nikolay Evgenievich – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; phone: +79281742585; the department of computer science; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.472.43

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-154-168

С.А. Дудко, И.И. Левин

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В настоящее время для решения задач на реконфигурируемых вычислительных системах используются различные системы автоматизированного проектирования. В большинстве случаев они состоят из двух основных компонент: компилятора (транслятора), переводящего текст исходной программы в графовую информационно-вычислительную структуру, и синтезатора, размещающего ее в архитектуре программируемых логических интегральных схем. Существующие синтезаторы, как правило, обрабатывают информационно-вычислительную структуру без комплексной оптимизации. Поэтому полученное решение прикладной задачи может содержать неэффективные фрагменты, снижающие быстродействие прикладной программы. Наиболее распространёнными примерами неэффективных вычислительных структур являются фрагменты, реализующие рекурсивные выражения, так как они снижают быстродействие прикладной программы. В статье предложены методы преобразования рекурсивных выражений (фрагментов с обратными связями), которые позволяют в автоматическом режиме сократить интервал обработки данных при решении прикладных задач на реконфигурируемых вычислительных системах. В основе методов лежат информационно-эквивалентные преобразования информационно-вычислительной структуры исходной задачи. Для каждого преобразования определен набор правил, которым должны удовлетворять операционные вершины вычислительной структуры. Применение правил позволяет выполнять эквивалентные преобразования не только над простыми структурами данных, такими как числа, но также и над более сложными структурами (матрицами, векторами, тензорами и т.п.). По результатам моделирования разработанные методы преобразования информационно-вычислительных структур с обратными связями позволяют сократить время решения прикладных задач примерно в 2–5 раз, за счет сокращения интервала обработки данных. Предложенные методы реализованы в прототипе оптимизирующего синтезатора информационно-вычислительных структур.

Информационно-эквивалентные преобразования; оптимизирующий синтезатор; реконфигурируемые вычислительные системы.

S.A. Dudko, I.I. Levin

TRANSFORMATION METHODS OF COMPUTING STRUCTURE WITH FEEDBACKS FOR EFFECTIVE IMPLEMENTATION ON RECONFIGURABLE COMPUTING SYSTEMS

At present, various computer-aided (CAD) systems are used for solving tasks on reconfigurable computing systems (RCS). In most cases, they consist of two main parts: a compiler (translator), which translates the source code of a program into a graph-like information and computing structure, and a synthesizer, which maps it on an FPGA architecture. As a rule, existing synthesiz-

ers process computing structures without any complex optimization. Therefore, the solution, generated by the synthesizer, may contain inefficient fragments, which decrease a task solution speed. The most common examples of inefficient computing structures are fragments which implement recursive expressions. The paper proposes transformation methods for recursive expressions (fragments with feedbacks), which allow automatically reduce the data supply interval when solving tasks on reconfigurable computing systems. The methods are based on information-equivalent transformations of the computing structure of the original task. For each transformation defined a set of rules that must be satisfied by the vertices of the computing structure. Applying rules allows to perform equivalent transformations not only on simple data structures such as numbers, but also on more complex structures (matrices, vectors, tensors, etc.). On the base of the simulation results, the developed transformation methods of computing structures with feedbacks allow to reduce the task solving time about 2–5 times by reducing the data supply interval. The proposed methods are implemented in a prototype of optimizing synthesizer.

Information-equivalent transformations; optimizing synthesizer; reconfigurable computing systems.

Введение. Для решения вычислительно трудоёмких задач за приемлемое время требуются высокопроизводительные вычислительные системы (ВС). Реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) [1, 2], построенные на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), доказали свою высокую эффективность при решении задач, требующих обработки больших объемов информации [3–4]. Поскольку создание прикладных программ для ПЛИС является длительной и трудоёмкой задачей, то при разработке схемотехнических решений на их основе, как правило, применяются различные системы автоматизированного проектирования (САПР). Основными частями данных САПР, чаще всего, являются компилятор (транслятор), выполняющий построение вычислительной структуры на основе исходного текста программы [1], и синтезатор, занимающийся компоновкой и размещением вычислительной структуры на кристаллах ПЛИС [5].

Существующие синтезаторы САПР [6–8], как правило, используют ряд эвристик и оптимизаций, для сокращения аппаратных затрат, отдельных фрагментов вычислительной структуры, но не применяют комплексную оптимизацию. Поэтому полученное синтезатором решение в ряде случаев может содержать неэффективные фрагменты, существенно снижающие производительность прикладной программы. Наиболее часто такие фрагменты характеризуются увеличенным (по сравнению с остальными подзадачами) интервалом обработки данных (скважностью) вычислительной структуры [9]. Как правило, такие случаи возникают при реализации рекурсивных выражений и выражений с косвенной адресацией, вычислительная структура которых содержит обратные связи.

Для сокращения времени решения задачи эти структуры необходимо оптимизировать. Оптимизация вычислительных структур – это задача высококвалифицированного инженера-схемотехника, требующая значительного времени на анализ, реализацию и тестирование.

В связи с этим возникает необходимость в разработке новых методов и средств для структурных преобразований неэффективных конструкций в автоматическом режиме, что существенно сократит время решения задачи и время создания программ для РВС, упростит процесс разработки и повысит удельную производительность прикладной задачи.

Информационно-эквивалентные преобразования. Вычислительная (информационно-вычислительная) структура задачи может быть представлена в виде графа $G(V, D)$, который содержит в себе множество вершин V и множество дуг D . Множество вершин V в свою очередь может быть представлено как тройка $V(Q, X, Y)$, где Q – множество операционных вершин, X – множество входных информационных вершин, Y – множество выходных информационных вершин. Операционная вершина вычислительной структуры представляет собой библио-

течный элемент, выполняющий заданную операцию над данными. Информационная вершина описывает данные, над которыми производятся вычисления в операционных вершинах. Дуги информационного графа определяют информационной обмен между вершинами графа.

Под информационно-эквивалентным преобразованием будем понимать такое преобразование, которое позволяет изменять вычислительную структуру решаемой задачи с выполнением следующего условия: при одинаковом входном воздействии (одинаковом наборе входных данных) на выходах обоих вычислительных структур (исходной и модернизированной) будет получен одинаковый (эквивалентный) результат. Далее будем называть информационно-эквивалентные преобразования просто эквивалентными.

Информационно-эквивалентные преобразования должны удовлетворять принципу биективности [10, 11], т.е. быть взаимно однозначными.

Для каждого эквивалентного преобразования должен быть определен набор правил, которым должны удовлетворять вершины информационно-вычислительной структуры, над которыми производятся преобразования. Эквивалентные преобразования могут образовывать цепочки преобразований (последовательность различных эквивалентных преобразований), которые в свою очередь могут объединяться в сценарий (алгоритм преобразования более сложных фрагментов информационного графа).

Для применения информационно-эквивалентных преобразований вычислительную структуру задачи целесообразно представить в виде плоского (неиерархического) графа, что позволит находить последовательно соединенные вершины графа. Поиск последовательностей вершин в графе является более простой операцией в отличие от поиска подобных фрагментов в тексте исходной программы, где зависимости между переменными и операциями могут быть распределены по различным частям текста. Поэтому поиск зависимостей и преобразование текста являются трудоемкой задачей, так как компилятору (транслятору) необходимо следить за множеством факторов (корректностью индексов операндов, раскрытием скобок, подстановкой результатов одного выражения в другое и т.д.). В связи с этим, проведение преобразований над информационно-вычислительной структурой, представленной в виде плоского графа, на этапе синтеза является предпочтительным решением.

Базовые информационно-эквивалентные преобразование. Современные ПЛИС имеют большой вычислительный ресурс, который продолжает расти, но при этом количество доступных пользователю каналов информационного обмена практически не изменилось за последние 15 лет. Поэтому при решении задач на ПЛИС необходимо эффективно использовать каналы информационного обмена. Для этого разработаны различные методы, позволяющие загружать разнородные данные по одному каналу, а затем разделять их внутри вычислительной структуры. В этом случае возникают ситуации, когда данные поступают на вершины вычислительной структуры не плотным потоком (каждый такт), а с некоторым интервалом подачи данных, большим единицы. Величина интервала подачи данных зависит от реализации вычислительной структуры икратно увеличивает время решения задачи.

Высокий интервал обработки данных (скважность, S) является одной из основных причин, снижающих производительность прикладной программы. Интервал обработки данных характеризует плотность формирования данных во входном/выходном потоке. При $S=1$ поток является плотным (новые данные формируются каждый такт); $S>1$ свидетельствует о наличии разрывов (задержек) при формировании данных.

Наиболее часто встречающимися структурами, увеличивающими интервал обработки данных, являются структуры с обратными связями. Увеличение интервала обработки данных подобных структур обусловлено необходимостью дожи-

даться результата по обратной связи для обработки текущего данного. Это приводит к замедлению не только фрагмента с обратной связью, но и всей вычислительной структуры, так как поток данных в последующих фрагментах тоже будет зависеть от интервала формирования выходных данных в обратной связи. Пример вычислительной структуры с обратной связью показан на рис. 1.

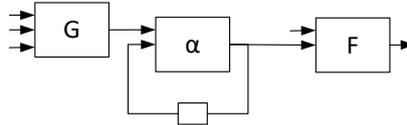


Рис. 1. Фрагмент вычислительной структуры с обратной связью

Каждая операционная вершина вычислительной структуры характеризуется собственным интервалом обработки данных (количество тактов, необходимое для выполнения операции). Интервал обработки данных в обратной связи может быть рассчитан как отношение длины критического пути (максимальный суммарный интервал обработки данных операционными вершинами, образующими обратную связь) к количеству регистров в обратной связи.

Рассмотрим набор базовых информационно-эквивалентных преобразований, основанных на математических законах ассоциативности и дистрибутивности [12, 13], которые будут использоваться для преобразования вычислительных структур с обратными связями.

1) Эквивалентное преобразование ассоциативных операционных вершин. Применение преобразования, схема которого представлена на рис. 2, позволяет выносить одну из операционных вершин за пределы обратной связи, уменьшая длину критического пути и, тем самым, снижая интервал обработки данных. Данное преобразование выполняется, если операционная вершина φ , является бинарной (имет два входа и один выход) и удовлетворяет условию ассоциативности [13]:

$$(a \varphi b) \varphi c = a \varphi (b \varphi c).$$

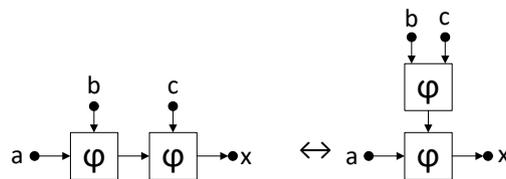


Рис. 2. Информационно-эквивалентное преобразование ассоциативных операционных вершин

2) Эквивалентное преобразование дистрибутивных операционных вершин. Использование данного преобразования позволяет изменять порядок следования вершин в вычислительной структуре задачи. Изменение порядка следования операционных вершин, показанное на рис. 3, необходимо проводить тогда, когда две ассоциативные вершины отделены друг от друга дистрибутивной, затем может быть применено преобразование ассоциативных вершин. Преобразование дистрибутивных вершин является эквивалентным при условии, что рассматриваемые вершины β и φ являются бинарными, а также дистрибутивными относительно множества K , над которым выполняются вычисления [13]:

$$(a \beta b) \varphi (a \beta c) = (b \varphi c) \beta a.$$

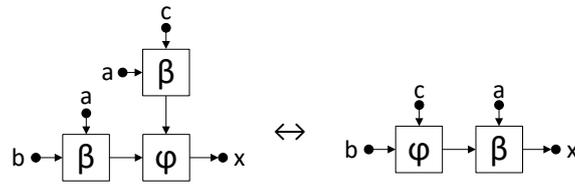


Рис. 3. Информационно-эквивалентное преобразование дистрибутивных операционных вершин

3) Пространственная свертка/развертка последовательности ассоциативных вершин. С помощью данного преобразования возможно представить последовательность ассоциативных вершин как одну общую вершину с обратной связью (рис. 4). Это позволяет разворачивать обратные связи в пространстве, и затем проводить над ними оптимизирующие преобразования, либо сворачивать набор ассоциативных вершин для экономии аппаратного ресурса.

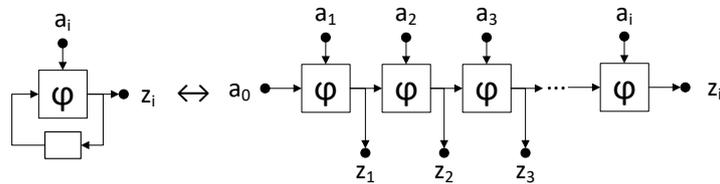


Рис. 4. Информационно-эквивалентное преобразование «свертки/развертки» последовательности ассоциативных вершин

На основе рассмотренных выше базовых информационно-эквивалентных преобразований можно предложить методы модернизации вычислительных структур с обратными связями, соответствующие рекурсивным выражениям.

Применение метода автоподстановки для преобразования рекурсивных выражений в вычислительной структуре. Одним из методов преобразования рекурсивных выражений, состоящих из дистрибутивных операций, является метод автоподстановки [14, 15], применяемый в конвейерных вычислениях над текстовым представлением задачи. Особенностью метода автоподстановки является то, что он может быть применен многократно к одному и тому же выражению, до тех пор, пока не будет получен необходимый результат. Используя концепцию метода автоподстановки как преобразования над математическими формулами, произведем подобные преобразования над информационно-вычислительной структурой задачи в графовом виде.

Рассмотрим следующий фрагмент вычислительной структуры (рис. 5).

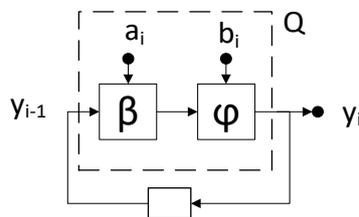


Рис. 5. Фрагмент вычислительной структуры с обратной связью

На рис. 5 операционные вершины β и φ представляют собой любые операции (либо блок операций), выполняемые над любыми структурами данных (числами, матрицами, векторами, тензорами и т.п.), для которых справедливы правила дистрибутивности и ассоциативности. В общем случае преобразование автоподстановки выполняется над множеством K , образующим полукольцо [13, 16, 17] относительно операционных вершин β и φ , то есть данные вершины удовлетворяют следующим условиям:

1. Для операционной вершины φ выполняются коммутативный и ассоциативный законы;
2. Для операционной вершины φ определен нейтральный элемент n^0 , такой что:

$$a \varphi n^0 = n^0 \varphi a = a;$$

3. Операционная вершина β образует полугруппу относительно множества K , над которым она определена (выполняется правило ассоциативности);
4. Операционные вершины β и φ дистрибутивны между собой.

Обозначим выделенный пунктирной линией фрагмент вычислительной структуры, показанный на рис. 5, как Q . Далее, будем считать, что интервал обработки данных вершинами β и φ равняется n и m соответственно. В таком случае интервал поступления данных на входы операционных вершин вычислительной структуры будет равняться $(n + m)$, что приводит к снижению быстродействия прикладной программы в $(n + m)$ раз. Очевидно, что для повышения быстродействия, необходимо уменьшить интервал поступления данных на входы операционных вершин, образующих обратную связь. Для этого предлагается распараллелить данный фрагмент вычислительной структуры так, чтобы одновременно выполнялся расчет $(n+m)$ значений.

Примем $n = m = 1$, тогда интервал поступления данных исходного фрагмента вычислительной структуры (рис. 5) будет равен 2. Преобразуем исходный фрагмент к следующему виду (рис. 6), воспользовавшись преобразованием свертки/развертки последовательности ассоциативных операционных вершин – добавив после текущего выходного сигнала $(n+m-1)$ подграфов Q .

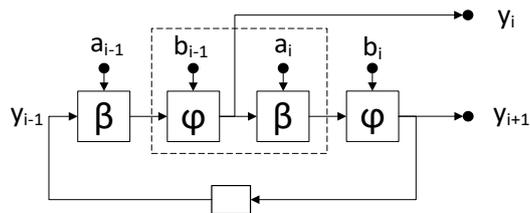


Рис. 6. Структурное расширение исходного фрагмента вычислительной структуры

Как можно заметить, для фрагмента вычислительной структуры, выделенного пунктирной линией (рис. 6), можно применить преобразование над дистрибутивными вершинами, предварительно заменив ветвящийся выход вершины φ на одиночный. Для этого перенесем выход с текущей вершины на предыдущую продублировав вычисления для вершины φ (рис. 7).

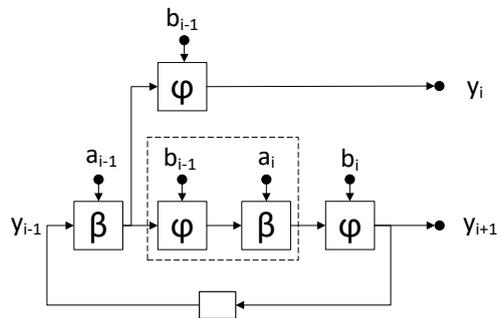


Рис. 7. Перенос ветвящегося выхода через операционную вершину

Далее, используя преобразование дистрибутивных вершин, изменим выделенный пунктирной линией фрагмент (рис. 7) вычислительной структуры:

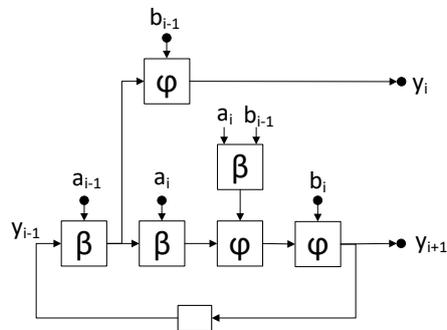


Рис. 8. Фрагмент вычислительной структуры после применения преобразования дистрибутивных операционных вершин

Упростим полученную вычислительную структуру (вынесем из обратной связи ассоциативные вершины), используя рассмотренные ранее эквивалентные преобразования:

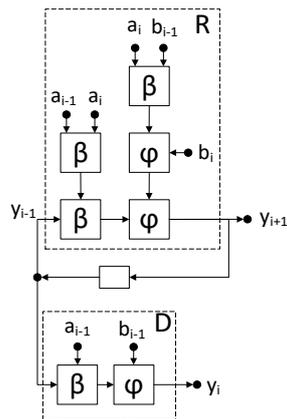


Рис. 9. Фрагмент вычислительной структуры после применения преобразования ассоциативных операционных вершин

Обозначим выделенные пунктиром фрагменты (рис. 9) вычислительной структуры как R (верхняя ветвь) и D (нижняя ветвь). После проделанных преобразований (рис. 9) интервал поступления данных для блока R равен 2. Так как уменьшить длину критического пути в блоке R не представляется возможным, то для увеличения быстродействия необходимо увеличить количество регистров в обратной связи – привести обратную связь к форме конвейер в конвейере [18]. Тогда входные данные блока R смогут формироваться плотным потоком, так как данные по обратной связи будут поступать из регистров каждый такт (после их инициализации). Для того, чтобы внести в обратную связь еще один регистр, необходимо получить еще один независимый изоморфный блок R. В общем случае необходимо получить $(n+m)$ параллельно выполняющихся изоморфных блоков с обратными связями.

Проанализировав фрагмент вычислительной структуры (рис. 9), можно заметить, что на верхней ветви формируются четные элементы выходной последовательности y ($y_0, y_2, y_4 \dots y_n$). Для того чтобы сформировать нечетные сигналы необходимо добавить после блока D блок R и образовать на нем обратную связь. Начальным значением регистра обратной связи будет выходное значение блока D. В итоге будут получены нечетные элементы выходной последовательности y ($y_1, y_3, y_5 \dots y_{n-1}$) (рис. 10).

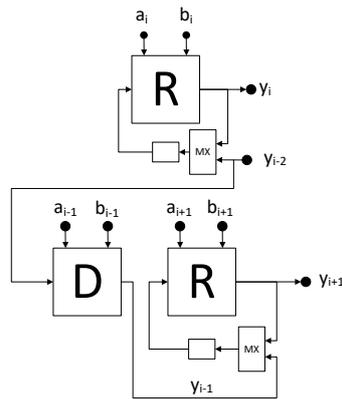


Рис. 10. Фрагмент вычислительной структуры после преобразований

Так как блоки R вычислительной структуры представляют собой независимые изоморфные структуры (подграфы), то данный фрагмент (рис. 10) может быть преобразована к форме конвейер в конвейере (рис. 11).

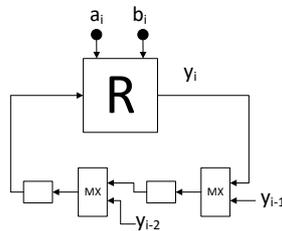


Рис. 11. Фрагмент вычислительной структуры, приведенный к форме конвейер в конвейере

В итоге, интервал поступления данных на входы блока R будет равен 1 (так как длина критического пути R равна 2, и в обратной связи находится 2 регистра). Таким образом в результате выполненных информационно-эквивалентных преобразований, удалось увеличить темп поступления входных данных (сократить интервал обработки данных в обратной связи) в 2 раза, и тем самым сократить время решения задачи в 2 раза.

Данный метод можно применять многократно, для этого к исходному фрагменту вычислительной структуры с обратной связью добавляется несколько изоморфных подграфов, общее количество которых равно исходному интервалу поступления данных. Затем над полученной структурой последовательно производятся эквивалентные преобразования дистрибутивных и ассоциативных операционных вершин.

Таким образом, применение данного метода при решении прикладных задач, в которых встречаются обратные связи с дистрибутивными вершинами, позволяет добиться плотного потока данных на входе и выходе вычислительной структуры. За счет этого удастся сократить общее время решения задачи.

Расширение метода замены переменной при преобразованиях рекуррентных выражений в вычислительной структуре. Еще одним методом преобразования рекурсивных выражений является метод замены переменных [19]. Данный метод применялся только для обратных связей с интервалом обработки данных равным двум ($S = 2$) [19]. Рассмотрим данный метод для преобразования рекурсивных выражений на примере следующей вычислительной структуры (рис. 12):

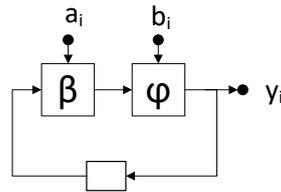


Рис. 12. Фрагмент вычислительной структуры с обратной связью

Аналогично предыдущему примеру, операционные вершины β и φ представляют собой любые операции, выполняемые над любыми структурами данных, для которых могут быть применены преобразования дистрибутивных и ассоциативных операционных вершин. В отличие от метода автоподстановки, данный метод требует, чтобы для любого элемента из множества K^1 , в котором заданы операции выполняемые операционными вершинами β и φ , был определен обратный элемент. В общем случае описываемые далее преобразования выполняются над множеством K^1 , образующим полукольцо с единицей [13, 16, 17] относительно вершин β и φ , то есть данные вершины удовлетворяют следующим условиям:

1. Для вершины φ выполняются коммутативный и ассоциативный законы
2. Для вершины φ определен нейтральный элемент (n^0), такой что:

$$a \varphi n^0 = n^0 \varphi a = a;$$

3. Вершина β образует полугруппу с единицей относительно множества K^1 , т.е. для β выполняется закон ассоциативности, а также для вершины β определен нейтральный элемент (n^1), такой что:

$$x \beta n^1 = n^1 \beta x = x;$$

4. Для вершины β определен обратный элемент, такой что:

$$x \beta \bar{x} = n^1;$$

5. Вершины β и φ являются дистрибутивными относительно друг друга.

Считая, что темп обработки данных вершинами β и φ равен 1 получим следующую временную диаграмму (рис. 13), из которой видно, что данные на выходе обратной связи формируются не плотным потоком, что увеличивает время решения прикладной программы.

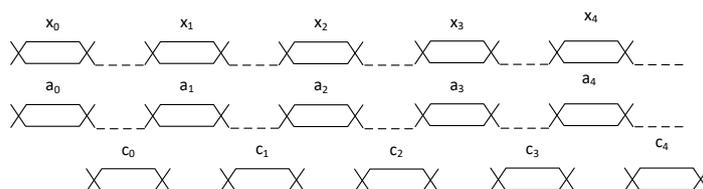


Рис. 13. Временная диаграмма обработки данных в обратной связи

Опираясь на базовые эквивалентные преобразование, преобразуем фрагмент вычислительной структуры с обратной связью (рис. 12). Воспользуемся преобразованием, которое будем называть «неполной дистрибутивностью». Суть данного преобразования заключается в использовании нейтрального и обратных элементов: выполнение операции β с нейтральным элементом (n^1) не изменяет итогового результата. При этом нейтральный элемент (n^1) может быть представлен как $n^1 = a \beta \bar{a}$. В итоге данное преобразование имеет следующий вид (рис. 14).

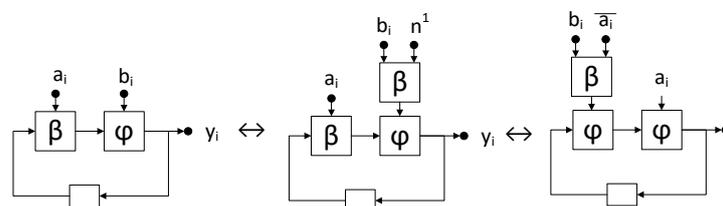
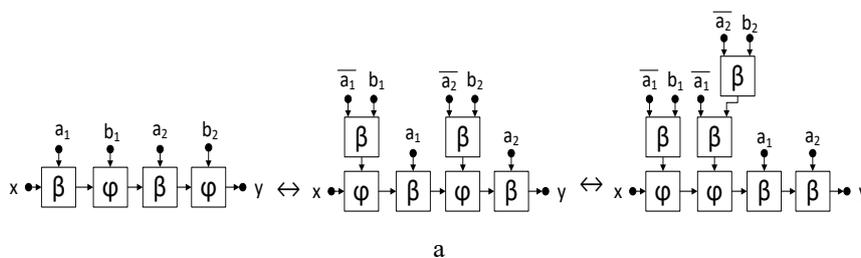


Рис. 14. Использование преобразования «неполной дистрибутивности» для пары дистрибутивных операционных вершин

В зависимости от количества итераций, которые необходимо выполнить во время вычислений, в обратной связи будет выполнено по n операций β и n операций φ , где n – общее количество итераций. Используя преобразование «неполной дистрибутивности», все операционные вершины β могут быть перемещены в одну сторону относительно операционных вершин φ . Рассмотрим действие метода более подробно, на примере отдельных итераций (рис. 15).



а

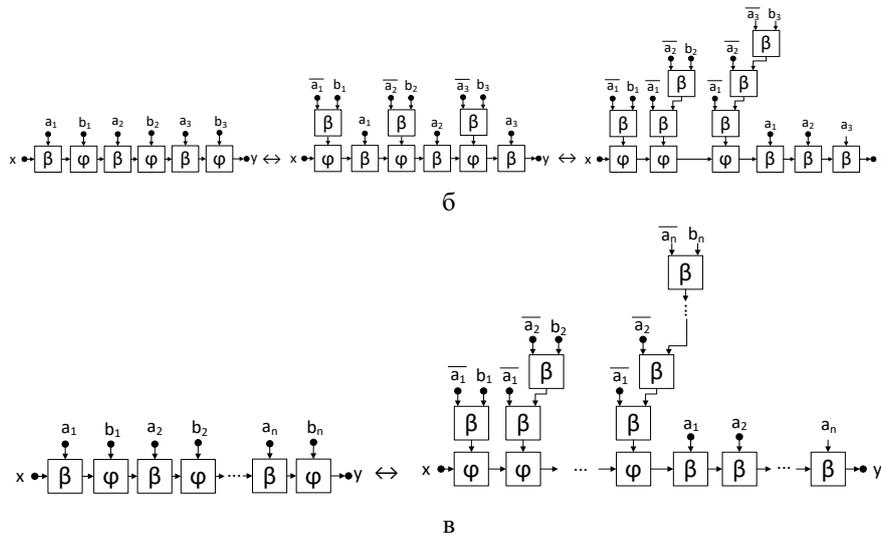


Рис. 15. Применение преобразования «неполной дистрибутивности» для последовательности дистрибутивных операционных вершин: а – для двух пар вершин; б – для трех пар вершин; в – для n пар вершин

Используя преобразование ассоциативных операционных вершин, преобразуем обобщенную вычислительную структуру, показанную на рис. 15,в.

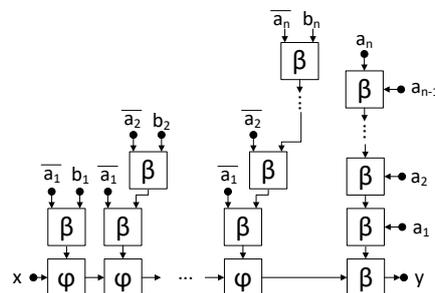


Рис. 16. Фрагмент вычислительной структуры после преобразования ассоциативных операционных вершин

Как можно заметить внешний сигнал, поступающий на операционную вершину φ (рис. 16) имеет дублирующие фрагменты. Избавимся от них, разветвив соответствующие выходные сигналы вершин β (рис. 17).

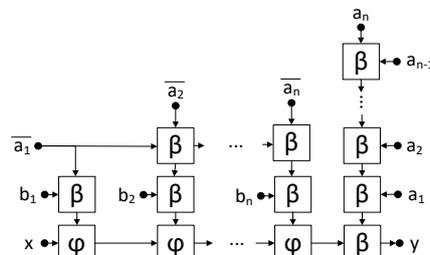


Рис. 17. Применение преобразования удаления дублирующих операционных вершин

Далее применим эквивалентное преобразование свертки/развертки последовательности ассоциативных вершин (рис. 18):

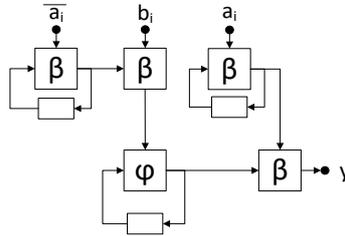


Рис. 18. Итоговый вид фрагмента вычислительной структуры после проведения всех преобразований

Используя данный метод преобразования удастся избавиться от обратной связи с двумя дистрибутивными вершинами, и перейти к трем обратным связям с одной ассоциативной операционной вершиной. Если темп обработки данных вершинами β и φ равен единице, тогда удастся сразу добиться плотного потока данных. Однако в случае если темп обработки данных операционными вершинами в обратной связи выше единицы, что наблюдается в современных прикладных задачах, то применение рассмотренного метода не позволяет сформировать плотный поток данных.

Для того, чтобы добиться плотного потока данных для случаев, когда темп обработки данных вершинами β и φ выше единицы, необходимо продолжить преобразования, применив метод раскрытия ассоциативных операционных вершин [20].

Обозначим «пирамидальную» часть преобразования раскрытия ассоциативных операций [20] как « Λ ». Тогда фрагмент вычислительной структуры (рис. 18) может быть преобразован к следующему виду:

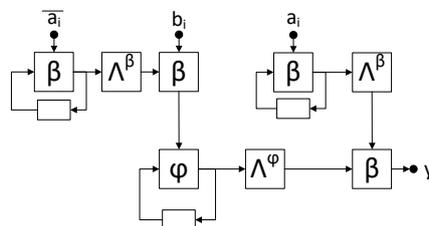


Рис. 19. Применение метода преобразования одиночных ассоциативных вершин

Использование данного преобразования позволяет добиться плотного потока данных (с интервалом обработки данных равным единице) в каждой из обратных связей без изменения порядка следования элементов в исходном потоке. При этом проведение данного преобразования требует наличия дополнительного аппаратного ресурса, что в настоящее время не является проблемой, так как современные ПЛИС имеют большой вычислительный ресурс, который продолжает расти, в отличие от количества доступных каналов информационного обмена.

Следует отметить, что, по сравнению с исходной вычислительной структурой (рис. 12), итоговая структура обладает меньшей устойчивостью. Узким местом полученной структуры являются участки обратных связей с одной ассоциативной вершиной, в которых происходит накопление результата потока данных a и \bar{a} , так как значение «накопления» в этом месте может переполниться или сброситься в ноль.

Применение данного метода преобразований позволит сформировать плотный поток данных на выходах обратных связей, что приведет к сокращению времени решения прикладных задач в различных предметных областях примерно в 2–5 раз.

Заключение. Предложенные методы преобразования рекурсивных выражений позволяют без участия схемотехника оптимизировать фрагменты вычислительной структуры с высоким интервалом обработки данных и сократить время решения задачи. Отличительной особенностью разработанных методов является их применение над информационно-вычислительной структурой, а не текстом исходной программы. Это позволяет проще выявлять структуры с обратными связями, и применять к ним набор базовых эквивалентных преобразований: преобразования дистрибутивных и ассоциативных операционных вершин, свертка/развертка последовательностей ассоциативных вершин, преобразования с нейтральными и обратными элементами. Базовые эквивалентные преобразования могут объединяться и образовывать методы преобразования более сложных вычислительных структур, таких как структуры с обратными связями (метод автоподстановки и метод замены переменной).

Результаты экспериментальных исследований разработанных методов в прототипе оптимизирующего синтезатора при решении задач линейной алгебры и цифровой обработки сигналов позволяют сделать вывод о сокращении времени решения прикладных задач примерно в 2–5 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гузик В.Ф., Каляев И.А., Левин И.И.* Реконфигурируемые вычислительные системы: учебное пособие / под общей ред. И.А. Каляева. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – 472 с.
2. *Compton K.* Reconfigurable Computing: A Survey of Systems and Software // ACM Computing Surveys. – June 2002. – Vol. 34, No. 2. – P. 171-210.
3. *Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К.* Современные и перспективные высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2015. – Т. 4, № 3. – С. 24-39.
4. *Muslim F.B., Ma L., Roozmeh M. and Lavagno L.* Efficient FPGA Implementation of OpenCL High-Performance Computing Applications via High-Level Synthesis // In IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 2747-2762. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2671881.
5. *Бибило П.Н., Романов В.И.* Интеграция САПР для синтеза логических схем с использованием глобальной оптимизации // Программные продукты и системы. – 2019. – № 1. – С. 26-33.
6. Intel® Quartus® Prime Standard Edition User Guide 18.1. Getting Started. UG-20173 | 2019.12.16.
7. Xilinx Vivado Design Suite. User Guide. Synthesis. UG901 (v2019.1) June 12, 2019.
8. Synopsys Synplify Pro for Microsemi Edition User Guide November 2016.
9. Rene Mueller, Jens Teubner, and Gustavo Alonso. Data processing on FPGAs. PVLDB, 2(1), August 2009.
10. *Верещагин Н.К., Шень А.* Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Ч. 1. Начала теории множеств. – 4-е изд., доп. – М.: МЦНМО, 2012. – 112 с.
11. *Коляда В.И., Кореновский А.А.* Курс лекций по математическому анализу: в 2-х ч. Ч. 1. – Одесса: Астропринт, 2009. – XXVII. – 369 с.
12. *Новиков Ф.А.* Дискретная математика для программистов: учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – 384 с.
13. *Воеводин В.В.* Линейная алгебра. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
14. *Kuck D.* The structure of computers and computations. John Wiley and Sons. Inc., New York, NY, 1978.

15. Самофалов К.Г., Луцкий Г.М. Основы теории многоуровневых конвейерных вычислительных систем. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
16. Васильев А.В., Мазуров В.Д. Высшая алгебра: Конспект лекций. В 2 ч. Ч. 1. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2010. – 143 с.
17. Ricky Aditya, Muhammad Taufiq Zulfikar, Ngarap Imanuel Manik. Testing Division Rings and Fields Using a Computer Program // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Vol. 59. – P. 540-549.
18. Доронченко Ю.И. Метод операционно-графового описания одновременных вычислений для многопроцессорных систем // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. “Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы – 2007”. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2007. – Т. 1. – С. 11-17.
19. Станишевский О.Б. Эффективность арифметической обработки при конвейерных и нейроконвейерных вычислениях // Конвейерные вычислительные системы: Тезисы докладов. – Кишинев, 1988.
20. Дудко С.А. Эквивалентные преобразования рекуррентных выражений в реконфигурируемых вычислительных системах // Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2020): Матер. 6-й Всероссийской научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – Т. 1. – С. 181-183.

REFERENCES

1. Guzik V.F., Kalyaev I.A., Levin I.I. Rekonfiguriruyemye vychislitel'nye sistemy: uchebnoe posobie [Reconfigurable computing systems: a textbook], ed. by I.A. Kalyaeva. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, 472 p.
2. Compton K. Reconfigurable Computing: A Survey of Systems and Software, *ACM Computing Surveys*, June 2002, Vol. 34, No. 2, pp. 171-210.
3. Levin I.I., Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Doronchenko Yu.I., Raskladkin M.K. Sovremennye i perspektivnye vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy s rekonfiguriruemoy arkhitekturoy [Modern and promising high-performance computing systems with reconfigurable architecture], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science], 2015, Vol. 4, No. 3, pp. 24-39.
4. Muslim F.B., Ma L., Roozmeh M. and Lavagno L. Efficient FPGA Implementation of OpenCL High-Performance Computing Applications via High-Level Synthesis, *In IEEE Access*, 2017, Vol. 5, pp. 2747-2762. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2671881.
5. Bibilo P.N., Romanov V.I. Integratsiya SAPR dlya sinteza logicheskikh skhem s ispol'zovaniem global'noy optimizatsii [Integration of CAD for synthesis of logic circuits using global optimization], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2019, No. 1, pp. 26-33.
6. Intel® Quartus® Prime Standard Edition User Guide 18.1. Getting Started. UG-20173 | 2019.12.16.
7. Xilinx Vivado Design Suite. User Guide. Synthesis. UG901 (v2019.1) June 12, 2019.
8. Synopsys Synplify Pro for Microsemi Edition User Guide November 2016.
9. Rene Mueller, Jens Teubner, and Gustavo Alonso. Data processing on FPGAs. *PVLDB*, 2(1), August 2009.
10. Vereshchagin N.K., Shen' A. Lektsii po matematicheskoy logike i teorii algoritmov. Ch. 1. Nachala teorii mnozhestv [Lectures on mathematical logic and the theory of algorithms. Part 1. The beginnings of set theory]. 4th ed. Moscow: MTSNMO, 2012, 112 p.
11. Kolyada V.I., Korenovskiy A.A. Kurs lektsiy po matematicheskomu analizu [A course of lectures on mathematical analysis]: In 2 part. Part 1. Odessa: Astroprint, 2009, XXVII, 369 p.
12. Novikov F.A. Diskretnaya matematika dlya programmistov: uchebnik dlya vuzov [Discrete mathematics for programmers: textbook for universities]. 3rd ed. Saint Petersburg: Piter, 2009, 384 p.
13. Voevodin V.V. Lineynaya algebra [Linear algebra]. 2nd ed. Moscow: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1980.
14. Kuck D. The structure of computers and computations. John Wiley and Sons. Inc., New York, NY, 1978.
15. Samofalov K.G., Lutskiy G.M. Osnovy teorii mnogourovnevnykh konveyernykh vychislitel'nykh system [Fundamentals of the theory of multilevel conveyor computing systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 272 p.

16. Vasil'ev A.V., Mazurov V.D. Vysshaya algebra: Konspekt lektsiy. V 2 ch. [Higher Algebra: Lecture Notes. In 2 part]. Novosibirsk: Novosib. gos. un-t, 2010, Part 1, 143 p.
17. Ricky Aditya, Muhammad Taufiq Zulfikar, Ngarap Imanuel Manik. Testing Division Rings and Fields Using a Computer Program, *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 59, pp. 540-549.
18. Doronchenko Yu.I. Metod operatsionno-grafovogo opisaniya odnovremennykh vychisleniy dlya mnogoprotsessornykh sistem [Method of operational graph description of simultaneous computations for multiprocessor systems], *Mater. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Mnogoprotsessornye vychisl. i upravlyayushchie sistemy – 2007"* [Materials of the International Scientific and Technical Conference "Multiprocessor computing and Control systems - 2007"]. Taganrog: TPI YuFU, 2007, Vol. 1, pp. 11-17.
19. Stanishevskiy O.B. Effektivnost' arifmeticheskoy obrabotki pri konveyernykh i neyrokonveyernykh vychisleniyakh [The efficiency of arithmetic processing in conveyor and neuroconveyor calculations], *Konveyernye vychislitel'nye sistemy: Tezisy dokladov* [Conveyor computing systems: Abstracts]. Kishinev, 1988.
20. Dudko S.A. Ekvivalentnye preobrazovaniya rekurrentnykh vyrazheniy v rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistemakh [Equivalent transformations of recurrent expressions in reconfigurable computing systems], *Superkomp'yuternye tekhnologii (SKT-2020): Mater. 6-y Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Supercomputer Technologies (SKT-2020): Materials of the 6th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Rostov-on-Don, Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, Vol. 1, pp. 181-183.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.Г. Капустян.

Дудко Сергей Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: dudko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79034318173; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; аспирант.

Левин Илья Израилевич – e-mail: iilevin@sfedu.ru; тел.: 88634612111; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Dudko Sergei Anatolievich – Southern Federal University, e-mail: dudko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034318173; the department of intellectual and multiprocessor systems; graduate student.

Levin Ilya Izrailevich – e-mail: iilevin@sfedu.ru; phone: +78634612111; head of department of intellectual and multiprocessor systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.633

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-168-176

Н.К. Жуков, В.А. Мордвинов, А.А. Русяков

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ В НОРМИРОВАНИИ И ГАРМОНИЗАЦИИ КОНТЕНТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрена разработанная авторизованная методика, основанная на Методе идеальной точки с использованием множества Парето, позволяющая с современных технологических позиций взглянуть на особенности информационного взаимодействия для оценочной деятельности и регулирования межагентных взаимодействий, которая была положена в основу предложенных при участии авторов обновлений дисциплины Российского Технологического Университета (МИРЭА), Института Информационных технологий, кафедры Инструментального и Прикладного Программного Обеспечения «Информационный менеджмент систем» четвертого курса бакалавриата направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия» (по профилю «Разработка программных продуктов и проектирование информационных систем»). Описаны основные преимущества Метода идеальной точки с применением множества Парето. Представлено математическое описание множества Парето и Метода идеальной точки. Применение модернизированного метода позволяет улучшить показатели эмерджентности в процессе усовершенствования

образовательных программ, соединения и реконструирования их модулей и межагентных взаимодействий между ними. Показан пример реализации модифицированного метода в информационной системе, с точки зрения нормирования и гармонизации образовательного контента. Настоящая статья включает введение, формальную постановку задачи, призванную решить актуальную проблему, рассматриваемую в диссертациях авторов, обзор существующих подходов в указанном методе, описание предлагаемого мультиагентного решения задачи с использованием математической модели, алгоритм реализации, описание применения предложенного подхода применительно к процессу диспетчирования задач и заключение. К основным преимуществам настоящей методики можно отнести выбор критериев, превосходящих другие по набору признаков, в указанном методе предполагается создание «идеального объекта», т. е. некоторого варианта решения, которое может приниматься как наилучшее из возможных решений. Предполагается, что процедура выбора превосходящего объекта состоит из нескольких шагов, формирование «идеального объекта», определение для каждого объекта многокритериального расстояния до «идеального объекта», анализ множества объектов на близость к «идеальному объекту», исключение объектов из изначального множества, которые признаны заведомо неудачными, а так же получение сокращенного множества допустимых объектов; оценка сокращенного множества допустимых объектов на эмерджентные показатели найденного решения.

Множество Парето; Метод идеальной точки; нормирование; гармонизация; когнитивность.

N.K. Zhukov, V.A. Mordvinov, A.A. Ruslyakov

THE MODIFICATION OF THE IDEAL POINT METHOD IN THE NORMALIZATION AND HARMONIZATION OF CONTENT IN INFORMATION SYSTEMS

The article discusses the developed authorized methodology based on the Ideal Point Method using the Pareto set, which makes it possible to look from modern technological positions at the features of information interaction for evaluating activities and regulating inter-agent interactions, which was the basis for the discipline updates of the Russian Technological University proposed with the participation of the authors (MIREA), Institute of Information Technologies, Department of Instrumental and Applied Software "Information Management of Systems" of the fourth year of the bachelor's degree program 09.03.04 "Software Engineering" (specializing in "Software Development and Design of Information Systems"). The main advantages of the Ideal Point Method using the Pareto set are described. The mathematical description of the Pareto set and the Ideal Point Method is presented. The use of the modernized method makes it possible to improve the indicators of emergence in the process of improving educational programs, connecting and reconstructing their modules and inter-agent interactions between them. An example of the implementation of the modified method in the information system is shown, from the point of view of standardization and harmonization of educational content. This article includes an introduction, a formal formulation of the problem, designed to solve an urgent problem considered in the dissertations of the authors, a review of existing approaches in this method, a description of the proposed multi-agent solution to the problem using a mathematical model, an implementation algorithm, a description of the application of the proposed approach in relation to the task scheduling process, and a conclusion ... The main advantages of this technique include the choice of criteria that surpass others in terms of a set of features; this method assumes the creation of an "ideal object", that is, a certain solution option that can be taken as the best possible solution. It is assumed that the procedure for selecting a superior object consists of several steps, the formation of an "ideal object", determination for each object of the multi-criteria distance to the "ideal object", analysis of the set of objects for proximity to the "ideal object", exclusion of objects from the initial set, which are deliberately recognized unsuccessful, as well as obtaining a reduced set of admissible objects; assessment of the reduced set of feasible objects for emergence indicators of the solution found.

Pareto set; Ideal point method; normalization; harmonization; cognition.

Введение. Поисковая функция в образовательных полях мультимедиа заключается в обнаружении и выделении из контентного массива таких медиафайлов, которые содержат информацию, удовлетворяющую информационную, когнитивную потребность пользователя, причём, с максимально возможным качеством воспроизведения в пределах допустимой загруженности системы [19].

К инструментам воздействия, на показатели, отображающие эффективность обнаружения и выделения медиафайлов, уверенно можно отнести нормирование и гармонизацию контента [19, 20].

Авторами настоящей статьи предложено использовать Метод идеальной точки [8] для урегулирования баланса гармонизации и нормирования, поскольку сам этот баланс очень тонкое явление, требующее особой точности, корректности и даже деликатности воздействий. Указанный метод заключается в нахождении границы в множестве Парето, ближайшей к точке утопии [1].

Под множеством Парето здесь понимается множество состояний показателей или параметров, рациональных по Парето, представленных «множеством альтернатив, рациональных в смысле Парето», либо «множеством Парето-рациональных альтернатив» [5]. Граница множества – это ограничение местопребывания зафиксированных точек, в определённой области, за пределами которой перемещение точек недопустимо [9]. Здесь точка утопии – целевая точка, отображающая сочетание наилучших значений всех параметров и/или показателей, не реализуемая при заданных инфологических/морфологических ограничениях [9].

Транскрипции, представленной выше понятийности вошли в базовую Онтологию трёхзвенного соглашения настоящего проекта (управленческого соглашения проекта, языкового/платформенного соглашения проекта, онтологического соглашения проекта) [17], где целеполагание работы направленно на создание, апробации и внедрения в учебно-творческий процесс ВШ РФ обновленных метода и методики гармонизации и нормирования образовательного контента с использованием модифицированного Метода идеальной точки. Это является предметной областью исследования. Объект исследования – информационно-методическое обеспечение учебного процесса [18] в высшей школе. Разработка выполняется в составе Инициативной НИР РТУ МИРЭА «Создание и внедрение в образовательную индустрию методологии и средств информационно-методической поддержки мультисервисного макромедиа обеспечения массового пользователя на основе использования мобильной техники» № госрегистрации АААА-А17-117042410165-8.

В указанном проекте выдвигается гипотеза, согласно которой применение Метода идеальной точки, и использование множества Парето, для рационалистического улучшения образовательного контента повышает эффективность и когнитивность указанной миссии.

Преимущества Метода идеальной точки. Дело в том, что достоинство предложенной модификации метода заключается в том, что решение многокритериальной задачи, описываемой множеством Парето, можно условно свести к однокритериальному подходу [12]. Метод идеальной точки здесь, выбран из числа других возможностей, таких как метод взвешенной суммы критериев [3], метод последовательных уступок [4], обобщённый скалярный критерий [7], метод суммы оценок частных критериев [6] и других, в связи с тем, что важным свойством множества Парето является возможность «выбраковать» из совокупности возможных решений [13] заведомо неудачные, уступающие другим по ряду критериев [10].

Так, например, в процессе апробации предложенного модифицированного метода в диссертационном исследовании соавтора настоящей статьи Н. Жукова «Интегративный подход к менеджменту имитационного моделирования информа-

ционных процессов и систем на основе итерационных аппроксимаций» выделены и выбракованы составляющие, неудовлетворительно вписывающиеся в установленное заданием предельное число допустимых аппроксимаций.

Аналогично, в диссертационной работе А. Русякова «Семиотическое исследование и упорядочение информационного морфизма в портално-сетевых комплексах Расширенной реальности (XR – extended reality)» выделена и показана несостоятельность некоторых семиотических вкладов, относящихся к дополнительному введению в картину XR – реальности конфигурации второстепенной, создающей информационной шум о физических объектах.

Преимущество Метода идеальной точки, в том, что он представляет своим множеством картину хорошо сбалансированных максимумов достижимости многопараметрических оценок и регуляторов, благодаря нахождению ближайшего решения к точке утопии, во множестве решений, представленных в указанном методе.

В объединенном виде множество Парето и Метод идеальной точки в разработанной методике представлен единым математическим описанием, в основе которого показано следующее.

С опорой на источник [2] здесь рассматривается на плоскости (U, V) множество Ω (рис. 1). Каждая его точка обладает одним из следующих свойств: либо все точки, ближайšie к ней, принадлежат множеству Ω (такая точка называется внутренней точкой множества Ω), либо сколь угодно близко от нее расположены как точки множества Ω , так и точки, принадлежащие (такие точки называются граничными точками множества Ω). Граничная точка может как принадлежать множеству Ω , так и не принадлежать.

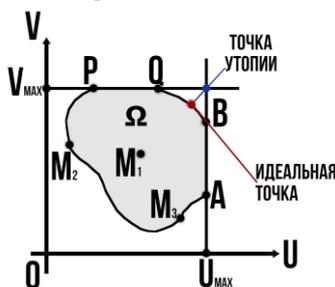


Рис. 1. Множество Ω с точками M_1, M_2, M_3 , Точка утопии, Идеальная точка

Авторами предложено разбиение множества Ω на три класса:

- ♦ в первый класс отнесены точки, которые, оставаясь во множестве Ω , можно сдвинуть так, чтобы одновременно увеличились обе координаты (в этот класс попадают все внутренние точки множества Ω и часть его граничных точек),
- ♦ второй класс образуют точки, перемещением которых по множеству Ω можно увеличить только одну из координат при сохранении значения второй (вертикальный отрезок AB и горизонтальный отрезок PQ) на границе множества Ω ,
- ♦ в третий класс попадут точки, перемещение которых по множеству Ω возможно лишь уменьшить либо одну из координат, либо обе (дуга BQ границы множества Ω) (рис. 1) [16].

Множество точек третьего класса называется множеством Парето, или границей Парето множества Ω [2].

Пусть на плоскости (x, y) задано множество Ω и в каждой точке этого множества определены две непрерывные функции:

$$U = \Phi(x, y) \text{ и } V = \Psi(x, y). \quad (1)$$

Предлагается рассмотреть следующую задачу.
Во множестве Ω найти точку (x^*, y^*) , в которой

$$\Phi(x^*, y^*) = \max_{(x,y) \in \Omega} \Phi(x, y) \text{ и } \Psi(x^*, y^*) = \max_{(x,y) \in \Omega} \Psi(x, y). \quad (2)$$

Предлагается записать это следующим образом

$$\Phi(x, y) \rightarrow \max_{(x,y) \in \Omega} \text{ и } \Psi(x, y) \rightarrow \max_{(x,y) \in \Omega}. \quad (3)$$

Обозначим на плоскости (U, V) все точки, координаты которых вычисляются по совокупности

$$U = \Phi(x, y), V = \Psi(x, y), (x, y) \in \Omega. \quad (4)$$

Можно показать, что наибольшее значение U , обозначим его как U_{\max} – и наибольшее значение V , обозначим его как V_{\max} – достигаются в разных точках, а точка с координатами (U_{\max}, V_{\max}) лежит вне множества Ω .

Пример реализации предложенного метода. В качестве примера, обозначенного выше метода, рассмотрим один из путей решения многокритериальной задачи по обнаружению и выделению медиафайла, в котором используется множество Парето.

На плоскости зададим (U, V) целевую точку, в качестве координат которой выберем сочетание наилучших значений обоих критериев U и V . В рассматриваемом случае это точка (U_{\max}, V_{\max}) . При этом считается, что обычно такая точка при заданных ограничениях не реализуется, поэтому её называть точкой утопии [2].

При этом строится множество Парето и на нем ищется точка, ближайшая к точке утопии – идеальная точка, находятся значения переменных, при которых функции:

$$L_1 = 2x + y + 1 = \max_{(x,y)} \quad (5)$$

$$L_2 = x - y + 5 = \max_{(x,y)} \quad (6)$$

Построение области допустимых решений выглядит следующим образом: А (0;0) – тип файла, В (0;3) – размер файла, С (2;3) – наименование файла, D (6;0) – дата создания файла, Е (6;1) – расположение в каталоге.

Координаты каждой точки плоскости Oxy преобразуются следующим образом.

$$L_1 = 2x + y + 1. \quad (7)$$

$$L_2 = x - y + 5. \quad (8)$$

Образуется плоскость OL_1L_2 . При этом в силу линейности проводимых преобразований прямоугольная система координат Oxy переходит в прямоугольную систему координат OL_1L_2 .

$$A(0;0) = A^*(13;11)$$

$$B(0;3) = B^*(1;5)$$

$$C(2;3) = C^*(4;2)$$

$$D(6;0) = D^*(8;4)$$

$$E(6;1) = E^*(14;10).$$

Предложено найти множество Парето (рис. 2). Это отрезок EA . Выберем комбинацию наилучших значений всех критериев. В данном случае это точка U с координатами (14;11) [2].

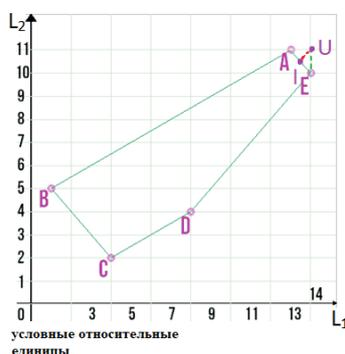


Рис. 2. Построение множества Парето

Далее во множестве Парето находится точка, расположенная ближе всех к точке утопии U. Из рисунка видно, что точка I, являющаяся основанием перпендикуляра, проведенного из точки U(14;11) к прямой EA, принадлежит отрезку EA. Это означает, что точка I – искомая. Найдем ее координаты. I (13.5;10.5)

Соответствующие значения x, y найдем из системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} 2x + y + 1 = 13.5 \\ x - y + 5 = 10.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$x = 6, y = 0.5$$

Таким образом, Парето-рациональное решение $L_1 = 13.5$, $L_2 = 10.5$, достигается при $x = 6$, $y = 0.5$.

Весовые коэффициенты в полиноме регулирования «нормирования – гармонизация» для рассматриваемой ситуации обретают значения, для $L_1 = 13.5$, $L_2 = 10.5$, достигается при $x = 6$, $y = 0.5$. Тогда полином эмерджентности, как следствие комплексной гармонизации/нормирования мультимедийного контента образовательной информационной системы выглядит следующим образом:

$$y(x) = a_1x + a_2y + \dots + a_nx_n, \quad (10)$$

где $y(x)$ – коэффициент эмерджентности [11] a_1, a_2, a_n , как это имеет место в рассматриваемом случае. x – когнитив-синтропия гармонизации, y – когнитив-синтропия нормирования, $x_3 \dots x_n$ – когнитив-синтропии других сопутствующих факторов воздействия на контент на семиотической основе. a_1 – весовой коэффициент нормирования, a_2 – весовой коэффициент гармонизации [20], $a_3 \dots a_n$ – весовой коэффициент других составляющих полинома.

По мнению авторов использование Метода идеальной точки совместно со множеством Парето для решения обсуждаемой задачи является инновационным решением в области наукознания информационных процессов и систем образовательного назначения [15, 14].

Заключение. Опыт применения предложенной методики показал, что такого рода решение создает все необходимые предпосылки для осуществления мер по гармонизации, нормированию и других мер в отношении образовательного контента, путем создания улучшенной онтологии и её применения.

Методика применена в улучшении образовательного контента лекционного материала дисциплины «Информационный менеджмент систем» направления подготовки бакалавриата 09.03.04 «Программная инженерия» и иных сопутствующих дисциплин, относимых к менеджменту информационных процессов и систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бодренко И.И.* Задачи многокритериальной оптимизации в экономике. Методы оптимальных решений. – URL: <http://bodrenko.org/moptr/moptr-19.htm> (дата обращения: 29.11.2020).
2. *Брильёнова Н.В.* Оптимальность по Парето. Множество. Метод идеальной точки. – URL: <https://natalibrilenova.ru/blog/1419-optimalnost-po-pareto-mnozhestvo-metod-idealnoy-tochki.html> (дата обращения: 30.11.2020).
3. *Boza, Miljkovic & Zizovic, Malisa & Petojević, Aleksandar & Damjanović, Nada.* New weighted sum model // *Filomat*. – 2017. – Vol. 31. – P. 2991-2998. – 10.2298/FIL1710991M.
4. *Diallo Amadou Bhoje, Dim Dike Terfa, Bakasov Sabir Rumovich, Bogatkov Valerij Nikolaevich.* Implementing "method of successive concessions" in selecting the optimal variant to protect a corporate network // *Вестник евразийской науки*. – 2018. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/implementing-method-of-successive-concessions-in-selecting-the-optimal-variant-to-protect-a-corporate-network> (дата обращения: 13.12.2020).
5. *Lockwood B.* The New Palgrave Dictionary of Economics. – 2nd ed. – London: Palgrave Macmillan, 2008. – ISBN 978-1-349-95121-5.
6. *Puerto Justo.* Decision criteria with partial information // *International Transactions in Operational Research*. – 2000. – No. 7. – P. 51-65. – 10.1016/S0969-6016(99)00026-X.
7. *Wang X., Zhu H.* Generalized Scalar-on-Image Regression Models via Total Variation // *J Am Stat Assoc*. – 2017. – Vol. 112 (519). – P. 1156-1168. – DOI: 10.1080/01621459.2016.1194846.
8. *Yingchao Wang, Ning Zhao, Hongwen Jing, Bo Meng, Xin Yin.* A Novel Model of the Ideal Point Method Coupled with Objective and Subjective Weighting Method for Evaluation of Surrounding Rock Stability // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2016. – Vol. 2016. Article ID 8935156. – 9 p.
9. *Березкин В.Е.* Методы аппроксимации границы Парето в нелинейных задачах многокритериальной оптимизации: дисс. ... канд. физ.-техн. наук. – М., 2008. – 185 с.
10. *Гарипов В.Р.* Многокритериальная оптимизация систем управления сложными объектами методами эволюционного поиска: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1999. – 166 с.
11. *Иванников А.Д., Кулагин В.П., Мордвинов В.А., Найханова Л.В., Овезов Б.Б., Тихонов А.Н., Цветков В.Я.* Получение знаний для формирования информационных образовательных ресурсов. – М.: ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика», 2008. – 440 с.
12. *Краснов М.В.* О сложности некоторых многокритериальных дискретных задач: дисс. ... канд. физ.-техн. наук. – Ярославль, 2003. – 74 с.
13. *Кудж С.А.* Методы сравнительного анализа // *Славянский форум* Номер: 3 (25). – 2019. – С. 140-150.
14. *Магомедов Ш.Г., Колясников П.В., Никульчев Е.В.* Разработка технологии контроля доступа к цифровым порталам и платформам на основе встроенных в интерфейс оценок времени реакций пользователей // *Российский технологический журнал*. – 2020. – Т. 8, № 6 (38). – С. 34-46.
15. *Мордвинов В.А.* Онтология моделирования и проектирования семантических информационных систем и порталов. Справочное пособие. – 2005. – 273 с.
16. *Ногин В.Д.* Расслоение конечного множества Парето // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. – 2015. – № 12-1. – С. 28-30.
17. *Сороко А.В.* Нормирование и гармонизация мультимедиа контента информационных систем в образовании // *Информатизация образования и науки*. – 2017. – № 4 (36). – С. 19-26.
18. *Томашевская В.С., Яковлев Д.А.* Условие аддитивности информационно-справочного киоска на основе времени загрузки страниц // *Российский технологический журнал*. – 2020. – Т. 8, № 1 (33). – С. 27-33.
19. *Шемончук Д.С.* Полнота и точность мультимедиа контента для существенно интенсифицированных мультимедиа систем // *Информационные системы и технологии*". – 2009. – № 3\53 (564). – С. 35-42.
20. *Шемончук Д.С.* Разработка и исследование методов и средств улучшения функционала мультимедийных порталных устройств в сфере управления образовательными процессами: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 155 с.

REFERENCES

1. *Bodrenko I.I.* Zadachi mnogokriterial'noy optimizatsii v ekonomike. Metody optimal'nykh resheniy [Problems of multicriteria optimization in economics. Optimal decision methods]. Available at: <http://bodrenko.org/moptr/moptr-19.htm> (accessed 29 November 2020).
2. *Bril'enova N.V.* Optimal'nost' po Pareto. Mnozhestvo. Metod ideal'noy tochki [Pareto optimality. Lots of. Ideal point method]. Available at: <https://natalibrilenova.ru/blog/1419-optimalnost-po-pareto-mnozhestvo-metod-idealnoy-tochki.html> (accessed 30 November 2020).
3. *Boza, Miljkovic & Zizovic, Malisa & Petojević, Aleksandar & Damjanović, Nada.* New weighted sum model, *Filomat*, 2017, Vol. 31, pp. 2991-2998. 10.2298/FIL1710991M.
4. *Diallo Amadou Bhoie, Dim Dike Terfa, Bakasov Sabir Rumovich, Bogatkov Valerij Nikolaevich.* Implementing "method of successive concessions" in selecting the optimal variant to protect a corporate network, *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science], 2018, No. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/implementing-method-of-successive-concessions-in-selecting-the-optimal-variant-to-protect-a-corporate-network> (accessed 13 December 2020).
5. *Lockwood B.* The New Palgrave Dictionary of Economics. 2nd ed. London: Palgrave Macmillan, 2008. ISBN 978-1-349-95121-5.
6. *Puerto Justo.* Decision criteria with partial information, *International Transactions in Operational Research*, 2000, No. 7, pp. 51-65. 10.1016/S0969-6016(99)00026-X.
7. *Wang X., Zhu H.* Generalized Scalar-on-Image Regression Models via Total Variation, *J Am Stat Assoc.*, 2017, Vol. 112 (519), pp. 1156-1168. DOI: 10.1080/01621459.2016.1194846.
8. *Yingchao Wang, Ning Zhao, Hongwen Jing, Bo Meng, Xin Yin.* A Novel Model of the Ideal Point Method Coupled with Objective and Subjective Weighting Method for Evaluation of Surrounding Rock Stability, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, Vol. 2016. Article ID 8935156, 9 p.
9. *Berezkin V.E.* Metody approksimatsii granitsy Pareto v nelineynykh zadachakh mnogokriterial'noy optimizatsii: diss. ... kand. fiz.-tekh. nauk [Methods of Pareto frontier approximation in nonlinear problems of multicriteria optimization: cand. of phys. and eng. sc. diss.]. Moscow, 2008, 185 p.
10. *Garipov V.R.* Mnogokriterial'naya optimizatsiya sistem upravleniya slozhnymi ob'ektami metodami evolyutsionnogo poiska: diss. ... kand. tekh. nauk [Multicriteria optimization of control systems for complex objects by methods of evolutionary search: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 1999, 166 p.
11. *Ivannikov A.D., Kulagin V.P., Mordvinov V.A., Naykhanova L.V., Ovezov B.B., Tikhonov A.N., TSvetkov V.Ya.* Poluchenie znaniy dlya formirovaniya informatsionnykh obrazovatel'nykh resursov [Obtaining knowledge for the formation of information educational resources]. Moscow: FGU GNII ITT «Informika», 2008, 440 p.
12. *Krasnov M.V.* O slozhnosti nekotorykh mnogokriterial'nykh diskretnykh zadach: diss. ... kand. fiz.-tekh. nauk [On the complexity of some multicriteria discrete problems: cand. of phys. and eng. sc. diss.]. Yaroslavl', 2003, 74 p.
13. *Kudzh S.A.* Metody sravnitel'nogo analiza [Comparative analysis methods], *Slavyanskiy forum* Nomer: 3 (25) [Slavic Forum Issue: 3 (25)], 2019, pp. 140-150.
14. *Magomedov Sh.G., Kolyasnikov P.V., Nikul'chev E.V.* Razrabotka tekhnologii kontrolya dostupa k tsifrovym portalam i platformam na osnove vstroennykh v interfeys otsenok vremeni reaktsiy pol'zovateley [Development of technology for access control to digital portals and platforms based on estimates of user reaction times built into the interface], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 6 (38), pp. 34-46.
15. *Mordvinov V.A.* Ontologiya modelirovaniya i proektirovaniya semanticheskikh informatsionnykh sistem i portalov. Spravochnoe posobie [Ontology of modeling and design of semantic information systems and portals. Reference book], 2005, 273 p.
16. *Nogin V.D.* Rassloenie konechnogo mnozhestva Pareto [Bundle of a finite Pareto set], *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2015, No. 12-1, pp. 28-30.
17. *Soroko A.V.* Normirovanie i garmonizatsiya multimedya kontenta informatsionnykh sistem v obrazovanii [Standardization and harmonization of multimedia content of information systems in education], *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science], 2017, No. 4 (36), pp. 19-26.

18. *Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A.* Usloviye additivnosti informatsionno-spravochного kioska na osnove vremeni zagruzki stranits [The condition of the additivity of the information and reference kiosk based on the page load time], *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 1 (33), pp. 27-33.
19. *Shemonchuk D.S.* Polnota i tochnost' mul'timedia kontenta dlya sushchestvenno intensifitsirovannykh mul'timedia sistem [Completeness and accuracy of multimedia content for significantly intensified multimedia systems], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2009, No. 3\53 (564), pp. 35-42.
20. *Shemonchuk D.S.* Razrabotka i issledovanie metodov i sredstv uluchsheniya funktsionala mul'timediyных portal'nykh ustroystv v sfere upravleniya obrazovatel'nymi protsessami: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of methods and means for improving the functionality of multimedia portal devices in the field of educational process management: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2009, 155 p.

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

Жуков Николай Кириллович – Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Российская академия наук; e-mail: nzhukov@romance.iki.rssi.ru, Москва, Россия; тел.: 89851378683.

Мордвинов Владимир Александрович – МИРЭА – Российский Технологический университет; e-mail: mordvinov@mirea.ru; Москва, Россия; кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения; к.т.н.; профессор.

Русляков Алексей Александрович – e-mail: ruslyakov@mirea.ru; кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения; ассистент.

Zhukov Nikolai Kirillovich – Space Research Institute RAS (IKI RAS), Russian Academy of Sciences; e-mail: nzhukov@romance.iki.rssi.ru; Moscow, Russia; phone: +79851378683.

Mordvinov Vladimir Alexandrovich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: mordvinov@mirea.ru; Moscow Russia; the department of instrumental and applied software; cand. of eng. sc.; professor.

Ruslyakov Alexey Alexandrovich – e-mail: ruslyakov@mirea.ru; the department of instrumental and applied software; assistant.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-176-192

О.Б. Лебедев, А.А. Жиглатый, Е.О. Лебедева

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ПОИСКОВОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ СБИС*

В работе для решения задачи планирования СБИС разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии. Задача формирования плана СБИС сводится к задаче формирования соответствующего польского выражения. Разработанный метод синтеза польского выражения включает построение дерева разрезов, выбор типов разрезов (H или V), идентификацию и ориентацию модулей. Эволюционирующая популяция разбита на пары агентов. Каждый член популяции – пара агентов, работающих совместно. При этом конструктивные алгоритмы A1 и A2, используемые агентами пары различаются. Задача, решаемая алгоритмом A1, формулируется как задача поиска взаимно однозначного отображения $F_k = M^ \rightarrow P$ множества модулей M с выбранными ориентациями, $|M^*| = |M|$ в множество P позиций шаблона Sh. Фактически решение заключается в выборе на графе G1 подмножества ребер $E^*1 \in E1$, входящих в соответ-*

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00260 А.

вующее отображение F_k . В алгоритме A2 в качестве модели пространства поиска решений для выбора типа, последовательности и места расположения разрезов в шаблоне Sh разработан граф $G2=(X, E2)$. $X=\{(x1_i, x2_i) | i=1, 2, \dots, n\}$ множество вершин графа $G2$, соответствует множеству P потенциальных позиций шаблона Sh для возможного размещения в них имен символов разрезов. Каждая потенциальная позиция $p_i \in P$ шаблона Sh моделируется двумя альтернативными вершинами $(x1_i, x2_i)$. Выбор при размещении разрезов вершины $x1_i$ указывает на то, что в позицию p_i помещен разрез типа V , выбор вершины $x2_i$ – указывает на то, что в позицию p_i помещен разрез типа H . Каждая итерация l общего алгоритма включает начальный и три основных этапа. Начальный этап заключается в следующем. Обнуляются матрицы ко-эволюционной памяти КЭП*1 и КЭП*2. На первом этапе каждая пара агентов $d_k=(a1_k, a2_k)$: – конструктивными алгоритмами A1 и A2 синтезирует свое решение $W_k=(E1_k^*, S_k)$; – формируется польское выражение Sh_k , соответствующее решению W_k ; – на базе Sh_k формируется дерево разрезов T_k ; – на базе T_k формируется план R_k и рассчитывается оценка решения F_k ; – агенты откладывают (добавляют) феромон в ячейки матриц коллективной эволюционной памяти КЭП*1 и КЭП*2, соответствующие ребрам решения $W_k=(E1_k^*, S_k)$ в графах поиска решений $G1$ и $G2$ в количестве пропорциональном оценке решения F_k . На втором этапе феромон, накопленный в КЭП*1 и КЭП*2 агентами популяции на итерации l , добавляется в КЭП1 и КЭП2. На третьем этапе осуществляется испарение феромона на ребрах графов $G1$ и $G2$. Тестовые испытания подтвердили эффективность предложенного метода. Временная сложность алгоритма, полученная экспериментальным путем, совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет $O(n^2)$.

Планирование СБИС; роевой интеллект; оптимизация; муравьиный алгоритм; адаптивное поведение.

O.B. Lebedev, A.A. Zhiglatiy, E.O. Lebedeva

DEVELOPMENT OF MODIFIED METHODS AND MODELS OF SEARCH ADAPTATION FOR SOLVING THE PROBLEM OF PLANNING VLSI

In this work, to solve the VLSI planning problem, a search algorithm has been developed based on a modified ant colony method. The task of forming a VLSI plan is reduced to the task of forming the corresponding Polish expression. The developed method for the synthesis of the Polish expression includes the construction of a tree of cuts, the choice of the types of cuts (H or V), identification and orientation of modules. The evolving population is split into pairs of agents. Each member of the population is a pair of agents working together. In this case, the constructive algorithms A1 and A2 used by the agents of the pair are different. The problem solved by Algorithm A1 is formulated as the problem of finding a one-to-one mapping $F_k=M^* \rightarrow P$ of the set of modules M with selected orientations, $|M^*|=|M|$ to the set P of positions of the template Sh . In fact, the solution consists in choosing on the graph $G1$ a subset of edges $E^*1 \in E1$ included in the corresponding mapping F_k . In Algorithm A2, the graph $G2=(X, E2)$ is developed as a model of the search space for solutions for choosing the type, sequence and location of cuts in the pattern Sh . $X=\{(x1_i, x2_i) | i=1, 2, \dots, n\}$ the set of vertices of the graph $G2$, corresponds to the set P of potential positions of the template Sh for the possible placement of the names of the cut symbols in them. Each potential position $p_i \in P$ of the template Sh is modeled by two alternative vertices $(x1_i, x2_i)$. The choice of the vertex $x1_i$ when placing the cuts indicates that a cut of type V is placed in position p_i , the choice of vertex $x2_i$ indicates that a cut of type H is placed in position p_i . Each iteration l of the general algorithm includes an initial and three main stages. The initial stage is as follows. Co-evolutionary memory matrices are nullified CEM*1 and CEM*2 are reset to zero. At the first stage, each pair of agents $d_k=(a1_k, a2_k)$: – with constructive algorithms A1 and A2 he synthesizes his solution $W_k=(E1_k^*, S_k)$; – the Polish expression Sh_k is formed, corresponding to the solution W_k ; – on the basis of Sh_k , a tree of sections T_k is formed; – on the basis of T_k , the plan R_k is formed and the estimate of the solution F_k is calculated; – agents deposit (add) the pheromone to the cells of the collective evolutionary memory (CEM) matrices CEM*1 and CEM*2 corresponding to the solution edges $W_k=(E1_k^*, S_k)$ in the solution search graphs $G1$ and $G2$ in an amount proportional to the solution estimate F_k . At the second stage, the pheromone accumulated in CEM*1 and CEM*2 by agents of the population at iteration l is added to CEM 1 and CEM2. At the third stage,

the pheromone is evaporated on the edges of the graphs G1 and G2. Tests have confirmed the effectiveness of the proposed method. The time complexity of the algorithm, obtained experimentally, coincides with theoretical studies and it is $O(n^2)$ for the considered test problems.

VLSI planning; swarm intelligence; optimization; ant algorithm; adaptive behavior.

Введение. В связи с уменьшением топологических размеров, повышением степени интеграции СБИС и сокращением сроков проектирования возникают принципиально новые требования к средствам проектированию СБИС [1, 2].

При проектировании больших систем часто топологическая схема требуется уже на ранних стадиях проектирования, хотя еще не были спроектированы все модули, т.е. не вся информация обо всех модулях имеется в наличии, часть этой информации может оказаться неточной. Планирование – это ранняя фаза проектирования СБИС. Оно дает информацию о приблизительных значениях площади, задержки, мощности и других рабочих характеристиках [1-4]. Задача планирования СБИС заключается в размещении на поле кристалла модулей, полученных на этапе разбиения, имеющих заданную площадь и не имеющих фиксированных размеров. Модули и кристалл имеют форму прямоугольников. При планировании решаются сразу две задачи: определяется взаимно расположение блоков друг относительно друга, т.е. их размещение, а также фиксируются размеры каждого блока. В результате планирования строится план кристалла, представляющий собой охватывающий прямоугольник, разделенный горизонтальными и вертикальными сегментами на неналагающиеся друг на друга прямоугольники, в которые следует поместить соответствующие модули [3, 4].

Основные проблемы задачи планирования кристалла СБИС – это проблема поиска подхода к представлению решения (плана) и проблема построения оптимизационной процедуры поиска решения.

Основные критерии оптимизации [1, 2, 5–7]: площадь кристалла; длина проводников; временные задержки; энергопотребление; температура. Основной целью оптимизации является минимизация общей площади кристалла [1, 2, 5].

Анализ существующих подходов к решению поставленной задачи показал, что удачными являются подходы, основанные на методах эволюционного моделирования. В последнее время для решения различных «сложных» задач, к которым относятся и задачи планирования всё чаще используются способы, основанные на применении биоинспирированных моделей [5,8,9]. В работе для решения задачи планирования разработан поисковый алгоритм на основе метода муравьиной колонии. Задача формирования плана СБИС сводится к задаче формирования соответствующего польского выражения. Разработанный метод синтеза польского выражения включает построение на основе шаблона дерева разрезов, выбор типов разрезов (H или V), идентификацию и ориентацию модулей.

1. Постановка задачи планирования. Проблема планирования формулируется следующим образом [1, 2]. Имеется множество модулей $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, n\}$. Каждый модуль характеризуется тройкой $\langle S_i, l_i, t_i \rangle$, где S_i – площадь модуля, а параметры l_i и t_i задают нижнюю и верхнюю границу значения h_i/w_i , т.е.

$$l_i \leq h_i/w_i \leq t_i, \quad (1)$$

где h_i – это высота модуля, w_i – ширина модуля [1,2,5]. План для множества модулей M представляет собой прямоугольник R , разрезанный вертикальными и горизонтальными линиями на множество прямоугольников блоков $B = \{b_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, в каждом из которых помещается соответственно модуль m_i [8].

Каждый прямоугольник b_i , предназначенный для размещения модуля m_i , имеет размеры x_i и y_i . При соблюдении ограничений (1) размеры прямоугольников должны также соответствовать ограничениям:

$$S_i \leq x_i \cdot y_i, \quad h_i \leq y_i, \quad w_i \leq x_i. \quad (2)$$

Будем считать, что связи между модулями m_i и m_j связывают центры соответствующих прямоугольников b_i и b_j [6–11]. Обозначим через d_{ij} длину связей между m_i и m_j а через c_{ij} – стоимость связей. Тогда критерий оптимизации при планировании имеет вид:

$$F = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i + \lambda \sum_{i,j=1}^n c_{ij} \cdot d_{ij},$$

при соблюдении ограничений (1), (2). Константа λ , управляет относительной важностью общей площади и взвешенной длиной связей [3,6,8,11,12]. Основная цель оптимизации – минимизация общей площади плана S_r , при соблюдении ограничений (1), (2).

Принято разбивать все множество структур плана на два класса: гильотинный и не гильотинный. Гильотинная структура может быть получена путем рекурсивного деления прямоугольника на две части горизонтальными и/или вертикальными разрезами. В качестве плана кристалла в работе используется структура, полученная путем рекурсивного использования «гильотинного разреза», т.е. последовательного разрезания прямоугольников на две части [8]. Для описания плана используются два способа: геометрическое и символическое.

Геометрическим описанием является дерево разрезов. На рис.1.а представлен план, а на рис. 1,б – соответствующее ему бинарное дерево «гильотинного разреза» $DR=(D, E)$, $D=\{d_i|j=1,2,\dots,2n-1\}$, $E \subseteq D \times D$, листьями которого являются вершины, соответствующие прямоугольникам с размещенными в них модулями, а внутренние вершины соответствуют разрезам: V – вертикальный, H – горизонтальный. На дереве висячие вершины (листья дерева), соответствующие прямоугольникам с размещенными в них модулями, помечены именами модулей, которые входят в эти прямоугольники, цифрами помечены внутренние вершины, соответствующие разрезам, причем V – вертикальный разрез, а H – горизонтальный разрез. На основе этой информации геометрическое представление и метризация плана осуществляется путем последовательной бинарной свертки прямоугольников (блоков b_i) по дереву разрезов, начиная от листьев дерева [11]. Процесс бинарной свертки представляет собой слияние смежных прямоугольников b_i и b_j , формирование прямоугольника b_k , определение его размеров и новых размеров для b_i и b_j .

Каждой внутренней вершине дерева разрезов будет соответствовать блок b_i (прямоугольник), полученный в результате бинарной свертки поддерева, имеющего корнем эту внутреннюю вершину. Размеры блоков и описывающего прямоугольника R плана определяются путем последовательной свертки блоков по дереву разрезов, исходя из размеров модулей, помещаемых в эти блоки [6, 8]. На рис. 1,с представлен план после свертки.

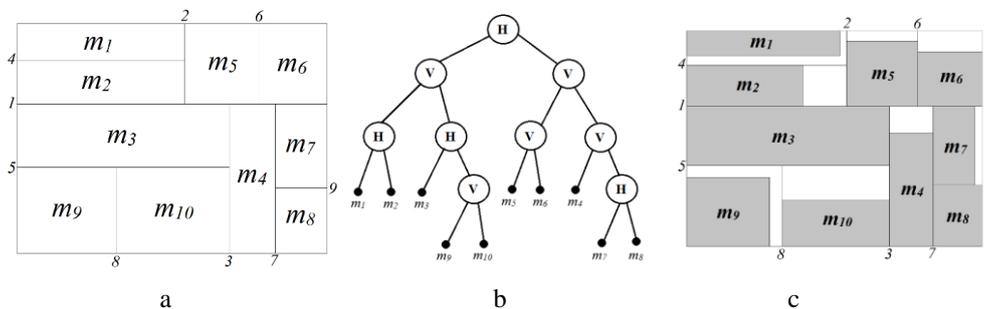


Рис. 1. а – план гильотинного разреза; б – дерево гильотинного разреза; с – план с размещенными в блоках модулями

Введём алфавит $A = \{M, TR\}$. Символьное представление структуры дерева разрезов можно задать, используя на базе алфавита A польское выражение для бинарного дерева [6, 8, 11], где множество модулей $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, n_M\}$ соответствует листьям дерева разрезов (блокам b_i), а множество $TR = \{H, V\}$ – соответствует разрезам. Польское выражение для дерева с идентифицированными вершинами, представленного на рис. 1.б, имеет вид: $D = \langle m_2 V m_3 m_4 V H m_5 m_6 H m_7 m_8 m_9 H V H V \rangle$. Процесс восстановления дерева по польскому выражению достаточно прост [6]. Последовательно слева направо просматривается польское выражение, и отыскиваются буквы H или V , соответствующие разрезам. Каждый такой разрез объединяет два ближайших образованных на предыдущих шагах подграфа, расположенных в польской записи слева от буквы H или V . Проиллюстрируем процесс свертки с помощью скобок:

$$D = ((m_1 m_2 V) (m_3 m_4 V) H) (m_5 m_6 H) (m_7 (m_8 m_9 H) V) H) V.$$

Отметим основные свойства польского выражения, выполнение которых необходимо, чтобы записи соответствовало дерево разрезов. Обозначим через n_M – число элементов польского выражения, принадлежащих множеству M , а через n_R – число элементов, соответствующих разрезам.

Свойства (ограничения) польского выражения:

1. Для каждого модуля m_i возможны два способа (две ориентации (O_1 или O_2)) размещения в прямоугольнике.

2. В состав выражения входят по одному разу все элементы множества $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, n_M\}$ с одной из меток – O_{1i} либо O_{2i} .

3. Для дерева разрезов всегда выполняется равенство $n_M = n_R + 1$.

4. Если в польском выражении провести справа от буквы H или V сечение, то слева от сечения число элементов, принадлежащих множеству M , больше числа элементов, соответствующих разрезам, минимум, на единицу.

Вышеперечисленные свойства фактически являются ограничениями, которыми должна удовлетворять польское выражение.

Назовем польское выражение D , построенное на базе алфавита $A = \{M, TR\}$ легитимным, если оно удовлетворяет вышеперечисленным ограничениям 1-4. Таким образом, легитимное выражение D является символьным представлением решения задачи планирования.

2. Построение методом муравьиной колонии плана СБИС с размещением и выбором типов разрезов, размещением и ориентацией модулей. Задача формирования плана СБИС сводится к задаче формирования соответствующего польского выражения. Предварительно формируется шаблон позиций польского выражения в виде вектора $Sh = \langle \bullet \bullet z_1 \bullet z_2 \bullet z_3 \bullet z_4 \dots \bullet z_n \rangle$. Знаки типа (\bullet) пронумерованы и соответствуют позициям для размещения в них имен модулей (листьев дерева). Между знаками (\bullet) расположены пронумерованные зоны позиций $\langle z_1 z_2 z_3 z_4 \dots z_n \rangle$, для размещения в них имен внутренних вершин дерева (разрезов). Число потенциальных позиций n_z в зоне z_i равно номеру i зоны. Позиции p_i , предназначенные для размещения в них разрезов, объединены в общий список $P = \langle p_i | i = 1, 2, \dots, n_p \rangle$ и пронумерованы, в соответствии с их расположением в шаблоне Sh .

Формирование соответствующего польского выражения заключается в назначении n_M элементов, соответствующим модулям, в позиции типа (\bullet) шаблона Sh , и n_R элементов типа $(H$ или $V)$ в зоны шаблона Sh с соблюдением рассмотренных выше свойств польского выражения (1-4). Число занятых разрезами позиций в зоне z_i , может быть равным от 0 до z_i а суммарное число занятых позиций во всех зонах равно n_R . Поиск решения сводится к поиску такого легитимного выражения Sh , которое оптимизирует показатель качества. Разработанный метод синтеза

польского выражения базируется на парадигме муравьиного алгоритма и включает построение дерева разрезов, выбор типов разрезов (H или V), идентификацию и ориентацию модулей. Для геометрической интерпретации плана выполняется процедура свертки [6–11].

Ядром муравьиного алгоритма является конструктивный алгоритм, с помощью которого каждый член популяции на каждой итерации находит решение задачи. В работе, в отличие от канонической парадигмы МА, эволюционирующая популяция разбита на пары агентов. Каждый член популяции – пара агентов, работающих совместно. Задача планирования решается каждой парой агентов двумя конструктивными алгоритмами. При этом конструктивные алгоритмы $A1$ и $A2$, используемые агентами пары различаются. Алгоритм $A1$ решает задачу выбора взаимного расположения и ориентации модулей в польском выражении. Алгоритм $A2$ решает задачу выбора последовательности, расположения и типа разрезов в польском выражении. Для решения задачи планирования, в отличие от канонической парадигмы МА [6, 8, 11], в качестве модели пространства поиска решений используются два графа $G1$ и $G2$.

Полный двудольный граф $G1 = ((M1 \cup M2) \cup P, E1)$ (рис. 2) используется алгоритмом $A1$ в качестве модели пространства поиска решений при размещении модулей в множестве позиций шаблона Sh и выборе ориентации модулей. $(M1 \cup M2)$ – множество вершин графа $G1$, соответствующих множеству модулей (первая доля графа); $M1 = \{m1_i | i=1, 2, \dots, n+1\}$, $M2 = \{m2_i | i=1, 2, \dots, n+1\}$. Вершины графа $G1$ объединены в альтернативные пары $m_i = (m1_i, m2_i)$. Вершина $m1_i$ соответствует модулю в первой ориентации, $m2_i$ – во второй. $P = \{p_j | j=1, 2, \dots, n\}$ множество вершин графа $G1$, соответствующих множеству позиций шаблона Sh для размещения в них имен модулей (листьев дерева). Если модуль m_i размещается в первой ориентации, то он обозначается, как $m1_i$, а ребро, обозначается как $(m1_i, p_j)$. Если модуль m_i размещается во второй ориентации, то он обозначается, как $m2_i$, а ребро обозначается, как $(m2_i, p_j)$. $E1$ множество ребер, связывающих множество вершин $(M1 \cup M2)$ с множеством вершин P .

Задача, решаемая алгоритмом $A1$, формулируется как задача поиска взаимно однозначного отображения $F_k = M^* \rightarrow P$ на графе $G1$ (множества модулей $M^* \subset M1 \cup M2$ с выбранными ориентациями, $|M^*| = |M|$ во множество P позиций шаблона Sh . Фактически решение заключается в выборе на графе $G1$ подмножества ребер $E1^* \in E1$, входящих в соответствующее отображение F_k .

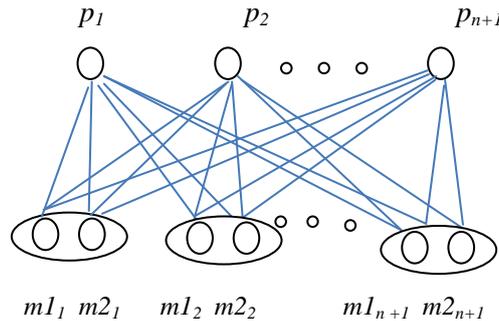


Рис. 2. Граф $G1$ поиска решений при размещении и выборе ориентации модулей

В качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП) алгоритмом $A1$ используется матрица КЭП, в которой для каждого ребра хранятся две интегральные оценки степени пригодности $\delta_{ij}(O_1)$ и $\delta_{ij}(O_2)$, в зависимости от ориентации модуля (рис. 3).

В столбце $\delta_{ij}(O_1)$ таблицы КЭП1 откладывается количество феромона, соответствующее степени пригодности ребра $(m1_i, p_j)$. В столбце $\delta_{ij}(O_2)$ откладывается количество феромона, соответствующее степени пригодности ребра $(m2_i, p_j)$.

модуль	Позиции									
	p_1		p_2		p_3		p_4		p_5	
	степени пригодности δ_{ij}		степени пригодности δ_{ij}		степени пригодности δ_{ij}		степени пригодности δ_{ij}		степени пригодности δ_{ij}	
	$\delta_{ij}(O_1)$	$\delta_{ij}(O_2)$	$\delta_{ij}(O_1)$	$\delta_{ij}(O_2)$	$\delta_{ij}(O_1)$	$\delta_{ij}(O_2)$	$\delta_{ij}(O_1)$	$\delta_{ij}(O_2)$	$\delta_{ij}(O_1)$	$\delta_{ij}(O_2)$
m_1										
m_2										
...										
m_n										

Рис. 3. Матрица коллективной эволюционной памяти КЭП1

В алгоритме A2 в качестве модели пространства поиска решений для выбора типа, последовательности и места расположения разрезов в шаблоне Sh разработан граф $G2=(X, E2)$ (рис. 4). $X=\{(x1_i, x2_i)|i=1,2, \dots, n\}$ множество вершин графа G2, соответствует множеству P потенциальных позиций шаблона Sh для возможного размещения в них символов разрезов. Каждая потенциальная позиция $p_i \in P$ шаблона Sh моделируется двумя альтернативными вершинами $(x1_i, x2_i)$. Выбор при размещении разрезов вершины $x1_i$ указывает на то, что в позицию p_i помещен разрез типа V, выбор вершины $x2_i$ – указывает на то, что в позицию p_i помещен разрез типа H. Граф G2 отображается на плоскости в виде многостадийной структуры, разбитой на зоны, включающие пары вершин (рис. 4). На рис. 4 представлен граф G2, построенный для пяти зон.

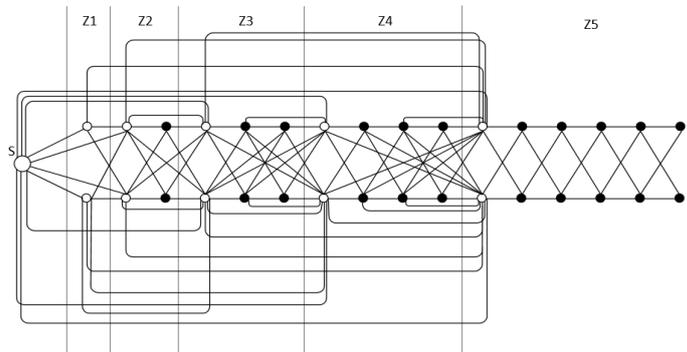


Рис. 4. Модель пространства поиска решений для выбора типа, последовательности и места расположения разрезов в шаблоне Sh

На рис. 5 представлены идентификаторы вершин графа G2.

Зона	1				2				3					
Позиция	1		1		2		2		1		2		3	
Разрез	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
Идентификатор	11V	11H	21V	21H	22V	22H	31V	31H	32V	32H	33V	33H		
№ Вершины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Опорные вершины	1		3				7							

Зона	4				5													
Позиция	1		2		3		4		1		2		3		4		5	
Разрез	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
Идентификатор	41V	41H	42V	42H	43V	43H	44V	44H	51V	51H	52V	52H	53V	53H	54V	54H	55V	55H
№ Вершины	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Опорные вершины	13										23							

Рис. 5. Матрица идентификаторов графа G2

Каждая позиция p_i в зоне шаблона Sh моделируется парой вершин, на плоскости расположенных одна над другой. Верхняя вершина пары соответствует состоянию позиции, при котором в нее помещается разрез типа V , нижняя вершина пары соответствует состоянию позиции, при котором в нее помещается разрез типа H . В соответствии со структурой шаблона Sh в зоне z_i располагается i пар вершин, являющиеся кандидатами для размещения в них разрезов. В работе используется упорядоченная идентификация вершин. Вершины проиндексированы в том же порядке в каком соответствующие им позиции расположены в шаблоне Sh . Множество вершин X разбито на подмножества в зависимости от того в какой зоне шаблона Sh расположены потенциальные позиции, соответствующие вершинам.

Для отображения взаимного пространственного расположения вершин графа, зоны и вершины в зонах расположены на плоскости в линейку, в соответствии с расположением позиций шаблона Sh на плоскости для размещения в них символов разрезов.

Вершины первой пары в каждой зоне называются опорными. На рис. 4 опорные вершины выделены кружками.

Ориентированные ребра, связывающие вершины графа, формируются следующим образом.

Стартовая вершина O маршрута S связана ориентированными ребрами (на рис. 4 слева направо) со всеми опорными вершинами.

Каждая опорная вершина связана ориентированными ребрами (на рис.4 слева направо) со всеми опорными вершинами, расположенными на рис.4 справа.

Каждая вершина зоны z_i (опорная или простая) связана ориентированными ребрами (на рис.4 слева направо) с первой (опорной) парой вершин в зоне z_{i+1} .

Каждая вершина зоны z_i (опорная или простая) связана с соседней справа парой простых вершин зоны z_i ориентированными ребрами (на рис.4 слева направо).

Алгоритмом $A2$ решается задача построения маршрута S на графе $G2$, начинающегося со стартовой вершины O и включающего вершины, соответствующие позициям на шаблоне Sh для размещения в них разрезов, с указанием типа, в том порядке, в котором они расположены в шаблоне Sh .

В качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП2) алгоритма $A2$ служит матрица смежности графа $G2$. Значением элемента x_{ij} матрицы смежности графа $G2$ является степень пригодности ребра, связывающего вершины x_i и x_j . Степень пригодности ребра определяется количеством отложенного феромона на ребре.

	11V	11H	21V	21H	22V	22H	31V	31H	32V	32H	33V	33H	...
11V	X	X											...
11H	X	X											...
21V			X	X									...
21H			X	X									...
22V					X	X							...
22H					X	X							...
31V							X	X					...
31H							X	X					...
32V									X	X			...
32H									X	X			...
33V											X	X	...
33H											X	X	...
...													...

Рис. 6. Матрица смежности графа $G2$, используемая в качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП2)

Процесс поиска решений итерационный. Эволюционирующая популяция разбита на пары агентов. Каждый член популяции – пара агентов, работающих совместно. При этом конструктивные алгоритмы $A1$ и $A2$, используемые агентами пары различаются. Алгоритмы разработаны на основе метода муравьиной колонии. Каждая итерация l общего алгоритма включает начальный и три основных этапа.

Начальный этап. Обнуляются вспомогательные матрицы КЭП*1 и КЭП*2.

На первом этапе каждая пара агентов $d_k=(a1_k, a2_k)$:

- ◆ конструктивными алгоритмами $A1$ и $A2$ на базе графов $G1$ и $G2$ и коллективной эволюционной памяти – матриц КЭП1 и КЭП2 синтезирует свое собственное решение $W_k=(E1_k^*, S_k)$;

- ◆ формируется польское выражение Sh_k , соответствующее решению W_k ;

- ◆ на базе Sh_k формируется дерево разрезов T_k ;

- ◆ на базе T_k формируется план R_k и рассчитывается оценка решения F_k ;

- ◆ агенты пары $d_k=(a1_k, a2_k)$ откладывают (добавляют) феромон в ячейки вспомогательных матриц коллективной эволюционной памяти КЭП*1 и КЭП*2, соответствующие ребрам решения $W_k=(E1_k^*, S_k)$ в графах поиска решений $G1$ и $G2$ в количестве пропорциональном оценке решения F_k .

На втором этапе после построения всеми парами агентов решений W_k феромон, накопленный в КЭП*1 и КЭП*2 агентами популяции на итерации l добавляется в КЭП1 и КЭП2.

На третьем этапе осуществляется испарение феромона на ребрах графов $G1$ и $G2$ (в КЭП1 и КЭП2).

В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон откладывается в матрицы КЭП1 и КЭП2 после полного формирования всеми агентами решений на текущей итерации. Для накопления феромона, откладываемого агентами за одну итерацию, используются вспомогательные дублирующие матрицы КЭП*1 и КЭП*2. Другими словами в процессе выполнения итерации агенты по очереди откладывают феромон в КЭП*1 и КЭП*2, а после завершения итерации феромон, накопленный агентами в КЭП*1 и КЭП*2, откладывается в КЭП1 и КЭП2.

Отметим, что оценка решения задачи планирования вычисляется после полного формирования решения $W=(E1^*, S)$ парой агентов $d_k=(a1_k, a2_k)$ и последующей свертке дерева разрезов [1].

На начальном этапе всем элементам матриц памяти КЭП1 и КЭП2 присваивается значение $\theta=\xi/\varepsilon$, где $\varepsilon=|E|$.

3. Первый конструктивный алгоритм $A1$. В работе для удобства изложения используется общее обозначение модуля, без указания типа ориентации, как – m_i .

С помощью первого конструктивного алгоритма $A1$ решается задача выбора ориентации и назначения множества модулей $M=\{m_i|i=1,2,\dots,n+1\}$ в множество позиций $P=\{p_j|j=1,2,\dots,n\}$ шаблона Sh . Поиск решения осуществляется первыми агентами $a1_k$ каждой пары $d_k=(a1_k, a2_k)$ на графе $G1$. Задача сводится к поиску на полном двудольном графе $G1=((M1 \cup M2) \cup P, E1)$ с использованием КЭП1 взаимно однозначного соответствия между множествами вершин M и P . Формируемое соответствие между M и P описывается множеством ребер $E1^* \subset E1$.

Основные ограничения формируемого множества ребер $E1^*$, заключаются в следующем:

- ◆ каждое ребро $(m_i, p_j) \in E1^*$, с одной стороны, инцидентно только одной вершине $m_i \in M$, с другой стороны – инцидентно одной и только одной вершине $p_j \in P$;

♦ формирование каждым агентом aI_k множества ребер EI^* осуществляется последовательно по шагам на базе множества EI ребер полного двудольного графа GI (пошагово).

В памяти агента aI_k имеется:

- ♦ список вершин $M_{1k}(t) \in M$, уже размещенных в позициях $P_{1k}(t) \subset P$;
- ♦ список вершин $M_{2k}(t) \in M$, оставшихся неразмещенными, $M_{1k}(t) \cup M_{2k}(t) = M$;
- ♦ список свободных позиций $P_{2k}(t) \subset P$, $P_{1k}(t) \cup P_{2k}(t) = P$.

♦ $\delta_{ij}(t)$ – количество феромона, на каждом ребре (m_i, p_j) графа GI .

В зависимости от ориентации модуля – O_1 или O_2 каждому ребру (m_i, p_j) соответствует оценка степени пригодности $\delta_{ij}(O_1)$, ребру (m_2, p_j) – $\delta_{ij}(O_2)$,

Приводится в начальное состояние память агента aI_k :

$$M_{1k}(1) = \emptyset; M_{2k}(1) = M; P_{1k}(1) = \emptyset; P_{2k}(1) = P; EI_k^*(1) = \emptyset.$$

Формирование агентом aI_k решений EI_k^* производится на множестве ребер EI графа $GI = (M \cup P, EI)$.

На шаге t формируется:

- ♦ множество вершин $M_{1k}(t) \in M$, уже размещенных в позициях $P_{1k}(t) \subset P$;
- ♦ множество вершин $M_{2k}(t) \in M$, оставшихся неразмещенными, $M_{1k}(t) \cup M_{2k}(t) = M$;
- ♦ список свободных позиций $P_{2k}(t) \subset P$, $P_{1k}(t) \cup P_{2k}(t) = P$.

Для каждой пары вершин $m_i \in M_{2k}(t)$ определяется набор ребер $U_i(t)$, $|U_i(t)| = |P_{2k}(t)|$, связывающих m_i с вершинами множества $P_{2k}(t)$. Пусть $U1_i(t)$ – множество ребер $(m1_i, p_j)$, инцидентных вершине $m1_i$, а $U2_i(t)$ – множество ребер $(m2_i, p_j)$, инцидентных вершине $m2_i$.

На основе данных КЭП1 для каждой вершины m_i подсчитываются суммарное количество феромона $\phi1_{ki}$, размещенного на ребрах $e_{ij} \in U1_i(t)$, и $\phi2_{ki}$, размещенного на ребрах $e_{ij} \in U2_i(t)$: $\phi1_{ki} = \sum_j \delta_{ij}(O_1) |e_{ij} \in U1_i(t)|$, $\phi2_{ki} = \sum_j \delta_{ij}(O_2) |e_{ij} \in U2_i(t)|$.

Для каждой вершины m_i подсчитываются общее суммарное количество феромона $\Omega_{ki} = \phi1_{ki} + \phi2_{ki}$.

Среди вершин $m_i \in M_{2k}(t)$ отыскивается вершина m_α с максимальным значением Ω_{ki} .

Если $(\phi1_{k\alpha})_{max} > (\phi2_{ki})_{max}$, то агент aI_k среди ребер $U1_\alpha(t) \subset U_i(t)$, инцидентных выбранной вершине m_α , с вероятностью $\Psi_\alpha(t) = \delta_{\alpha j}(O_1)(t) / \phi1_{ki}$ выбирает ребро $e_{\alpha j} = (m1_\alpha, p_j)$, которое включается в формируемое агентом aI_k множество ребер $EI_k^*(t+1)$.

Если $(\phi2_{k\alpha})_{max} > (\phi1_{ki})_{max}$, то агент $a2_k$ среди ребер $U2_\alpha(t) \subset U_i(t)$, инцидентных выбранной вершине m_α , с вероятностью $\Psi_\alpha(t) = \delta_{\alpha j}(O_2)(t) / \phi1_{ki}$ выбирается ребро $e_{\alpha j} = (m2_\alpha, p_j)$, которое включает в формируемое агентом aI_k множество ребер $EI_k^*(t+1)$.

Далее, выполняются постпроцедуры.

$$EI_k^*(t+1) = EI_k^*(t) \cup e_{\alpha j}.$$

$$M_{1k}(t+1) = M_{1k}(t) \cup m_\alpha; M_{2k}(t+1) = M_{2k} \setminus m_\alpha.$$

$$P_{1k}(t+1) = P_{1k} \cup p_j; P_{2k}(t+1) = P_{2k} \setminus p_j.$$

Переход к следующему шагу.

Процесс формирования агентом aI_k множества EI_k^* завершается при $M_{2k}(t) = P_{2k}(t) = \emptyset$.

4. Второй конструктивный алгоритм A2. Второй конструктивный алгоритм A2 решает задачу выбора типа разреза, зоны на шаблоне Sh и места в зоне для размещения в нем разреза.

Поиск решения осуществляется вторыми агентами $a2_k$ каждой пары $d_k=(a1_k, a2_k)$ на разработанной модели (граф $G2$) пространства поиска решений, учитывающей специфику решаемой задачи.

Задача сводится к поиску на графе $G2=(X,E2)$, с использованием КЭП2, маршрута S_k , включающего вершины, соответствующие позициям на шаблоне Sh , для размещения в них разрезов, с указанием типа, в том порядке, в котором они расположены в шаблоне Sh .

Формирование каждым агентом $a2_k$ маршрута S_k осуществляется на графе $G2$ последовательно по шагам (пошагово), начиная с начальной вершины O .

Агенты обладают памятью. Вершины графа $G2$ могут находиться в одном из двух состояний – активном и пассивном, которое меняется в процессе построения маршрута. Для отображения состояния вершин используется массив $\Theta=\{\theta_i | i=1,2,\dots,n\}$ текущего состояния вершин графа $G2$. Если $\theta_i=1$, то вершина x_i в активном состоянии и может служить кандидатом для размещения в ней разрезов, если $\theta_i=0$, то вершина x_i в пассивном состоянии и не является кандидатом для размещения в ней разреза. На каждом шаге t в памяти агента $a2_k$ хранится:

- ◆ число зон и разрезов N_z формируемого польского выражения;
- ◆ число N_r и список разрезов (вершин графа $G2$), уже вошедших в состав формируемого маршрута $S_k(t)$;
- ◆ последняя вершина $end(t-1)$ вошедшая в состав маршрута $S_k(t-1)$ на шаге $(t-1)$;
- ◆ параметры вершины $end(t-1)$: z_e – номер зоны, в которой размещена вершина $end(t-1)$, τ_e – тип вершины $end(t-1)$: $\tau_e=1$ – опорная или $\tau_e=0$ простая вершина;

Приводится в начальное состояние память агента $a2_k$:

Элементы массива $\Theta=\{\theta_i | i=1,2,\dots,n\}$ приводятся в активное состояние, т.е. $(\forall i) [\theta_i=1]$; фиксируется: число зон и разрезов N_z ; $t=0$; $N_r(t)=0$; $S_k(t)=\emptyset$; $end(t)=O$; $z_e=0$; $\tau_e=0$.

Первой процедурой на шаге t формируется список ребер U_e^k графа $G2$, которые исходят из вершины $end(t-1)$ и входят в находящиеся в активном состоянии вершины множества X_e^k .

На базе списка X_e^k формируется список $XK_e^k \subset X_e^k$ вершин – кандидатов для выбора очередной позиции, не приводящих к нарушению ограничений польского выражения.

Формирование XK_e^k производится в соответствии со структурой графа $G2$, описанной выше (см. рис. 4). В XK_e^k включаются:

- 1) все, если такие есть, опорные вершины, входящие в X_e^k ;
- 2) ближайшая в зоне z_e к вершине $end(t-1)$ пара простых вершин, если такая есть.

Далее, среди ориентированных ребер, входящих в вершины множества XK_e^k , выбирается ребро e_{max} , на котором в графе $G2$ отложено максимальное количество феромона и вершина x_{max} , в которую входит ребро e_{max} . Ребро включается в маршрут $S_k(t)$. Выполнение постпроцедуры: $N_r(t)=N_r(t)+1$; $S_k(t)=S_k(t-1) \cup e_{max}$.

Фиксация последней вершины $end(t)$, вошедшей в состав маршрута $S_k(t)$ на шаге (t) и ее параметров: z_e, τ_e .

Во всех зонах последняя в активном состоянии пара простых вершин переходит в пассивное состояние. Переход к следующему шагу.

Процесс формирования агентом $a2_k$ маршрута S_k завершается после распределения по позициям всех разрезов.

После построения агентами пары $d_k=(a1_k, a2_k)$ решения $W=(E1^*, S_k)$, оно последовательно трансформируется в польскую запись, дерево разрезов, а затем алгоритмом свертки в план $R_k(l)$ для которого рассчитывается оценка решения $F_k(l)$. Оценки, полученные всеми агентами на одной итерации суммируются и вносятся в матрицы коллективной эволюционной памяти. После испарения феромона в матрицах КЭП выполняется следующая итерация МА.

5. Эволюционный алгоритм планирования.

1. Задается число модулей и их геометрические параметры.
2. Задается критерий оптимизации.
3. В соответствии с исходными данными формируются шаблон позиций польского выражения в виде вектора $Sh = \langle \mathbf{o}_1 \mathbf{o}_2 \mathbf{o}_3 \mathbf{o}_4 \dots \mathbf{o}_R \rangle$.
4. В соответствии с исходными данными формируются две модели пространства поиска решений: два графа поиска решений $G1$ и $G2$.
5. Задаются значения управляющих параметров.
6. Задается число пар агентов N_a в популяции.
7. Задается число итераций – N_i .
8. Формируются матрицы коллективной эволюционной памяти КЭП1 и КЭП2. На всех ребрах исходных графов поиска решений $G1$ и $G2$ (в соответствующих ячейках КЭП1 и КЭП2) откладывается начальное количество феромона.
9. $l=1$. (l – номер итерации)
10. Обнуление элементов матриц КЭП*1 и КЭП*2.
Начало работы 1 конструктивного алгоритма A1.
11. $7. k=1$. (k – номер агента).
12. Формируются начальные значения параметров памяти для агента $a1_k$ популяции Z_l . $t=0$. $M_{1k}(t)=\emptyset$. $M_{2k}(t)=M$. $P_{1k}(t)=\emptyset$. $P_{2k}(t)=P$. $EL^k(t)=\emptyset$.
13. $t=t+1$. (t – номер шага).
14. Для каждой пары вершин $m_i \in M_{2k}(t)$ определяется набор ребер $U_i(t)$, $|U_i(t)|=|P_{2k}(t)|$, связывающих m_i с вершинами множества $P_{2k}(t)$. Пусть $U1_i(t)$ – множество ребер $(m1_i, p_j)$, инцидентных вершине $m1_i$, а $U2_i(t)$ – множество ребер $(m2_i, p_j)$, инцидентных вершине $m2_i$.
15. На основе данных КЭП1 для каждой вершины m_i подсчитываются суммарное количества феромона $\varphi1_{ki}$, размещенного на ребрах $e_{ij} \in U1_i(t)$, и $\varphi2_{ki}$, размещенного на ребрах $e_{ij} \in U2_i(t)$: $\varphi1_{ki} = \sum_j \delta_{ij}(O1) |e_{ij} \in U1_i(t)|$, $\varphi2_{ki} = \sum_j \delta_{ij}(O2) |e_{ij} \in U2_i(t)|$.
16. Для каждой вершины m_i подсчитываются общее суммарное количество феромона $\Omega_{ki} = \varphi1_{ki} + \varphi2_{ki}$.
17. Среди вершин $m_i \in M_{2k}(t)$ отыскиваются вершина m_a с максимальным значением Ω_{ki} .
18. Если $(\varphi1_{ka})_{max} > (\varphi2_{ki})_{max}$, то агент $a1_k$ с вероятностью $\Psi_a(t) = \delta_{aj}(O1)(t) / \varphi1_{ki}$ включает ребро $e_{aj} = (m1_a, p_j)$, инцидентное вершине m_a , в формируемое агентом множество $EL^k(t+1)$.
Если $(\varphi2_{ka})_{max} > (\varphi1_{ki})_{max}$, то агент $a2_k$ с вероятностью $\Psi_a(t) = \delta_{aj}(O2)(t) / \varphi2_{ki}$ включает ребро $e_{aj} = (m2_a, p_j)$, инцидентное вершине m_a , в формируемое агентом множество $EL^k(t+1)$.
19. Выполнение постпроцедур после шага t .
 $EL^k(t+1) = EL^k(t) \cup e_{aj}$.
 $M_{1k}(t+1) = M_{1k}(t) \cup m_a$; $M_{2k}(t+1) = M_{2k}(t) \setminus m_a$.
 $P_{1k}(t+1) = P_{1k}(t) \cup p_j$; $P_{2k}(t+1) = P_{2k}(t) \setminus p_j$.
20. Если $M_{2k}(t+1) = \emptyset$, т.е. все модули получили назначение и ориентацию агентом $A1_k$, то переход к 21 (алгоритму A2), иначе переход к 14. Переход к следующему шагу.
Процесс формирования агентом $a1_k$ множества EL^k завершается при $M_{2k}(t) = P_{2k}(t) = \emptyset$.
21. *Начало работы 2 конструктивного алгоритма. (2й агент $a2_k$).*
22. Формируются начальные значения параметров памяти для агента $a2_k$ популяции Z_l . Фиксируется: число зон и разрезов N_z . $t=0$. $N_r=0$. $S_k(t-1) = \emptyset$. $end(t) = \emptyset$, z_e, τ_e .
Все элементы массива $\Theta = \{\theta_i | i=1, 2, \dots, n\}$ приводятся в активное состояние, т.е. $(\forall i) [\theta_i = 1]$.

23. $t=t+1$. (t – номер шага).

24. Формируется список ребер $U^k_e(t)$ графа $G2$, исходящих из вершины $end(t-1)$ и список находящихся в активном состоянии вершин множества X^k_e , в которые входят ребра списка $U^k_e(t)$.

25. На базе списка $X^k_e(t)$ формируется список $XX^k_e(t) \subset X^k_e(t)$ вершин – кандидатов для выбора очередной позиции, не нарушающих ограничений польского выражения.

26. Среди ребер, входящих в вершины множества $XX^k_e(t)$ выбирается ребро e_{max} , на котором в графе $G2$ отложено максимальное количество феромона, Это ребро включается в маршрут $S_k(t)$.

27. Выполнение постпроцедур после шага t . $N_r=N_r+1$. $S_k(t)=S_k(t-1) \cup e_{max}$.

Фиксация последней вершины $end(t)$, вошедшей в состав маршрута $S_k(t)$ на шаге (t) и ее параметров: z_e , τ_e . Во всех зонах последняя в активном состоянии пара простых вершин переходит в пассивное состояние.

28. Если $N_r < N_z$, то переход к 19 (алгоритму A2), иначе переход к 24.

29. Формируется польское выражение $Sh_k(l)$, соответствующее решению $W_k(l)=(E1_k, S_k)$, полученному парой агентов $d_k=(a1_k, a2_k)$.

30. На базе W_k формируется дерево разрезов $T_k(l)$.

На базе $T_k(l)$ алгоритмом свертки формируется план $R_k(l)$ и рассчитывается оценка решения $F_k(l)$. Расчет количества феромона пропорционального оценке $F_k(l)$ $\tau_k(l)=Q/F_k(l)$.

31. Агенты откладывают (добавляют) феромон в ячейки матриц коллективной эволюционной памяти КЭП*1 и КЭП*2, соответствующие ребрам решения $W_k=(E1_k, S_k)$ в графах поиска решений $G1$ и $G2$ в количестве пропорциональном оценке решения $F_k(l)$.

32. Если $k < N_a$, то $k=k+1$ и переход к 12, иначе переход к 33.

33. Сложение матриц КЭП1 и КЭП*1, КЭП2 и КЭП*2.

34. Выполняется процедура испарения феромона на ребрах графов поиска решений $G1$ и $G2$.

35. Если $l < N_b$, то $l=l+1$ и переход к 7, иначе переход к 36.

36. Конец работы алгоритма.

6. Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования программы ПМК проводились на контрольных примерах с известным оптимумом F_{opt} , синтезированные известным методом AFEKO – Floorplanning Examples with Known Optimal area [14–22].

При проведении испытаний фиксировалось число итерации, при которых алгоритм находил лучшее решение решению. Сравнения результатов производилась по показателю F_{opt}/F – «*степень качества*», где F – оценка полученного решения. На основе обработки экспериментальных исследований была построена средняя зависимость степени качества от числа итераций и от размера популяции (рис. 7). Анализ результатов показал, что лучшие решения были получены в пределах 120–130 итерации. Решение близкое к оптимальному, было получено среднем на 125 итерации. В результате анализа показателей качества, полученных разработанным алгоритмом на тестовых примерах с известным оптимумом установлено, что у 70 % примеров значение показателя оптимально, у 15 % примеров – на 5 % хуже, а у 15 % – хуже не более, чем на 2 %.

Так же были проведены экспериментальные исследования, характеризующие зависимость времени выполнения алгоритма от размера задачи. Для определения временной сложности алгоритма при проведении тестовых испытаний исследовалась зависимость продолжительности работы алгоритма от количества блоков. Общая оценка лежит в пределах $O(n^2)$ - $O(n^3)$.

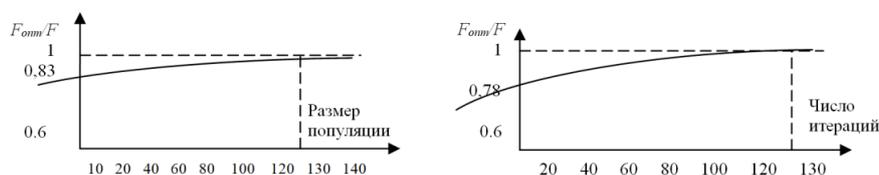


Рис. 7. Зависимость качества алгоритма от размера популяции и числа итераций

Для сравнения качества разработанного алгоритма планирования использовались стандартные тесты (бенчмарки), используемые разработчиками для оценки разработанных алгоритмов [12, 13]. Стандартные тесты (бенчмарки) созданы на MCNC (Microelectronics Center of North Carolina) образцах элементов. Были использованы пять типов корпусов, в которых количество элементов варьировалось от 9 до 49. Самый большой корпус – для платы ami49 на 49 элементов, с 42 интерфейсами ввода-вывода, 408 связями и 931 ножкой. Сравнение производилось по значению площади.

Для сравнения были выбраны наиболее известные поисковые алгоритмы планирования: АД – адаптивный [3]; МА – меметический [14]; ГЕН – генетический [15]; ГА – гибридный [16]; ПМК – разработанный муравьиный. Эксперименты разработанного алгоритма проводились на ЭВМ типа IBM PC с процессором Pentium, а результаты у сравниваемых алгоритмов получены на базе платформы Ultra1-Spark.

Результаты разработанного алгоритма по площади превосходят результаты существующих алгоритмов (табл.1). Эксперименты показали, что при больших размерностях временные показатели разработанных алгоритмов превосходят показатели сравниваемых алгоритмов при лучших значениях целевой функции, отклонение целевой функции от оптимального значения меньше в среднем на 6 %.

Таблица 1

Сравнение результатов работы алгоритмов

Бенч марка	АЛГОРИТМ				
	АД	ГЕН	МА	ГА	ПМК
arte	49425136,4	49425136,4	49396354	49396354	49196354
херох	24954567,8	24954567,8	24873723	24895479	23957366
hp	12232485	12232485	12176343	12194845	11393236
ami33	3510173,5	3530173,4	3520854	3538838	34190074
ami49	136133614,4	136133614,4	134285950	137343334	128591325

АД – адаптивный; ГЕН – генетический; МА – меметический; ГА – гибридный; ПМК – муравьиный.

Заключение. В работе для решения задачи планирования СБИС разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии. Задача формирования плана СБИС сведена к задаче соответствующего польского выражения. Предложена методика формирования польского выражения на основе шаблона, заключающаяся в назначении элементов, соответствующих модулям и разрезам, в позиции шаблона Sh , с соблюдением свойств польского выражения. Поиск решения сводится к поиску такого легитимного выражения Sh , которое оптимизирует показатель качества.

Разработанный метод синтеза польского выражения базируется на парадигме муравьиного алгоритма и включает построение дерева разрезов, выбор типов разрезов (H или V), идентификацию и ориентацию модулей. Для геометрической ин-

терпретации плана выполняется процедура свертки [6]. Ядром муравьиного алгоритма является конструктивный алгоритм, с помощью которого каждый член популяции на каждой итерации находит решение задачи. В работе, в отличие от канонической парадигмы МА, эволюционирующая популяция разбита на пары агентов. Каждый член популяции – пара агентов, работающих совместно. Задача планирования решается каждой парой агентов двумя конструктивными алгоритмами. При этом конструктивные алгоритмы $A1$ и $A2$, используемые агентами пары различаются. Алгоритм $A1$ решает задачу выбора взаимного расположения и ориентации модулей в польском выражении. Алгоритм $A2$ решает задачу выбора последовательности, расположения и типа разрезов в польском выражении. Для решения задачи планирования методом, отличным от канонической парадигмы МА, разработаны модели пространства поиска решений – два графа $G1$ и $G2$. Полный двудольный граф $G1$ используется алгоритмом $A1$ в качестве модели пространства поиска решений при размещении и выборе ориентации модулей в множестве позиций шаблона Sh . В алгоритме $A2$ в качестве модели пространства поиска решений для выбора типа, последовательности и места расположения разрезов в шаблоне Sh разработан граф $G2=(X, E2)$. $X=\{(x1_i, x2_j)|i=1,2,\dots,n\}$ множество вершин графа $G2$, соответствует множеству P потенциальных позиций шаблона Sh для возможного размещения в них разрезов. Матрица смежности графа $G2$, используется в качестве коллективной эволюционной памяти. Значением элемента x_{ij} матрицы смежности графа $G2$ является степень пригодности ребра, связывающего вершины x_i и x_j .

Тестовые испытания подтвердили эффективность предложенного метода. Временная сложность алгоритма, полученная экспериментальным путем, совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет $O(n^2)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Планирование сверхбольших интегральных схем на основе интеграции моделей адаптивного поиска // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 84-101.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 336 с.
3. Kureichik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid evolutionary algorithm of planning VLSI // Proceedings of the 12th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference. – Portland, 2010. – P. 821-822.
4. Pritha B., Megha S., Susmita S.-K. Floorplanning for Partially Reconfigurable FPGAs // IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Sys. – 2011. – No. 1. – P. 8-17.
5. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 448 с.
6. Лебедев О.Б. Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог. Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
7. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедев В.Б. Гибридизация роевого интеллекта и генетической эволюции на примере размещения // Электронный журнал «Программные продукты, системы и алгоритмы». – Тверь: Изд-во «Центрпрограммсистем», 2017. – № 4.
8. Лебедев О.Б. Планирование СБИС на основе метода муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7. – С. 67-73.
9. Mourelle M. Swarm intelligent systems. – Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006. – 217 p.
10. Qi L. et al. Simulated annealing based thermal-aware floor planning // International Conference on Electronics, Communications and Control. – 2011. – P. 463-466.
11. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Биоинспирированные методы планирования кристалла СБИС // Тр. VI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем». Сборник трудов. – М.: ИПИМ РАН, 2012. – С. 171-176.

12. *Ерошенко И.Н.* Разработка генетического алгоритма кластерного планирования СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7. – С. 54-60.
13. *Sherwani N.A.* Algorithms for VLSI Physical Design Automation. – Third Edition, Kluwer Academic Publisher. – USA: 2013. – 572 p.
14. *Potti S., Pothiraj S.* GPGPU Implementation of Parallel Memetic Algorithm for VLSI Floorplanning Problem // Trends in Computer Science, Engineering and Information Technology, Communications in Computer and Information Science. – 2011. – P. 432-441.
15. *Ерошенко И.Н.* Методы адаптации генетических алгоритмов к задаче планирования СБИС // Тр. конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS-IT'11». – М.: Физматлит, 2011. – С. 138-145.
16. *Chen J., Zhu W.* A hybrid genetic algorithm for VLSI floorplanning // IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. – 2010. – P. 128-132.
17. *Cong J., Nataneli G., Romesis M., Shinnerl J.* An Area-Optimality Study of Floorplanning // Proceeding of the International Symposium on Physical Design. – Phoenix, AZ, 2004. – P. 78-88.
18. *Cong J., Romesis M., Xie M.* UCLA Optimality Study Project. <http://cadlab.cs.ucla.edu/~pubbench>. 2004.
19. MCNC Electronic and Information Technologies (Online). Available: www.mcnc.org.
20. hMetis [Online]. Available: <http://www-users.cs.umn.edu/karypis/memis/hmet300>. HB Floorplan Benchmarks [Online]. Available: <http://cadlab.cs.ucla.edu/cpmo/HBSuite.html>.
21. IBM-PLACE 2.0 benchmark suits [<http://er.cs.ucla.edu/benchmarks/-ibm-place2/bookshelf/ibm-place2-all-bookshelf-nopad.tar.gz>].
22. *Adya S.N.* ISPD02 IBM-MS Mixed-size Placement Benchmarks [<http://vlsicad.eecs.umich.edu/BK/ISPD02bench/>].

REFERENCES

1. *Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev V.B.* Planirovanie sverkhbol'shikh integral'nykh skhem na osnove integratsii modeley adaptivnogo poiska [Planning of very large-scale integrated circuits based on the integration of adaptive search models], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [News RAS. Theory and Control Systems], 2013, No. 1, pp. 84-101.
2. *Norenko I.P.* Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchebnik [Basics of computer-aided design: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU imeni N.E. Baumana, 2006, 336 p.
3. *Kureichik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Hybrid evolutionary algorithm of planning VLSI, *Proceedings of the 12th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*. Portland, 2010, pp. 821-822.
4. *Pritha B., Megha S., Susmita S.-K.* Floorplanning for Partially Reconfigurable FPGAs, *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Sys.*, 2011, No. 1, pp. 8-17.
5. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 448 p.
6. *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.
7. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedev V.B.* Gibridizatsiya roevogo intellekta i geneticheskoy evolyutsii na primere razmeshcheniya [Hybridization of swarm intelligence and genetic evolution on the example of placement], *Elektronnyy zhurnal "Programmnye produkty, sistemy i algoritmy"* [Electronic journal "Software products, systems and algorithms"]. Tver': Izd-vo «TSentprogrammsistem», 201, No. 4.
8. *Lebedev O.B.* Planirovanie SBIS na osnove metoda murav'inoi kolonii [VLSI planning based on the ant colony method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7, pp. 67-73.
9. *Mourelle M.* Swarm intelligent systems. Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006, 217 p.
10. *Qi L. et al.* Simulated annealing based thermal-aware floor planning, *International Conference on Electronics, Communications and Control*, 2011, pp. 463-466.
11. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Bioinspirirovannyye metody planirovaniya kristalla SBIS [Bioinspired methods of VLSI crystal planning], *Tr. VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem»*. Sbornik

- trudov* [Proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference «Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems». Collection of works]. Moscow: IPPM RAN, 2012, pp. 171-176.
12. *Eroshenko I.N.* Razrabotka geneticheskogo algoritma klaster'nogo planirovaniya SBIS // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7, pp. 54-60.
 13. *Sherwani N.A.* Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher. USA: 2013, 572 p.
 14. *Potti S., Pothiraj S.* GPGPU Implementation of Parallel Memetic Algorithm for VLSI Floorplanning Problem, *Trends in Computer Science, Engineering and Information Technology, Communications in Computer and Information Science*, 2011, pp. 432-441.
 15. *Eroshenko I.N.* Metody adaptatsii geneticheskikh algoritmov k zadache planirovaniya SBIS [Methods for adapting genetic algorithms to the VLSI planning problem], *Tr. kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS-IT'11»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS-IT'11»]. Moscow: Fizmatlit, 2011, pp. 138-145.
 16. *Chen J., Zhu W.* A hybrid genetic algorithm for VLSI floorplanning, *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2010, pp. 128-132.
 17. *Cong J., Nataneli G., Romesis M., Shinnerl J.* An Area-Optimality Study of Floorplanning, *Proceeding of the International Symposium on Physical Design*. Phoenix, AZ, 2004, pp. 78-88.
 18. *Cong J., Romesis M., Xie M.* UCLA Optimality Study Project. Available: <http://cadlab.cs.ucla.edu/~pubbench>. 2004.
 19. MCNC Electronic and Information Technologies (Online). Available: www.mcnc.org.
 20. hMetis [Online]. Available: <http://www-users.cs.umn.edu/karypis/metis/hmet300>. HB Floorplan Benchmarks [Online]. Available: <http://cadlab.cs.ucla.edu/cpmo/HBSuite.html>.
 21. IBM-PLACE 2.0 benchmark suits [<http://er.cs.ucla.edu/benchmarks/-ibm-place2/bookshelf/ibm-place2-all-bookshelf-nopad.tar.gz>].
 22. *Adya S.N.* ISPD02 IBM-MS Mixed-size Placement Benchmarks [<http://vlsicad.eecs.umich.edu/BK/ISPD02bench/>].

Статью реумендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.П. Карпенко.

Лебедев Олег Борисович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085135512; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Жиглатый Артемий Александрович – e-mail: artemiy.zhiglaty@gmail.com; тел.: 89185916819; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Лебедева Екатерина Олеговна – e-mail: lbedevakate@mail.ru; тел.: 89289591426; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Lebedev Oleg Borisovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085135512; the department of computer aided design; associate professor

Zhiglatiy Artemy Alexandrovich – e-mail: artemiy.zhiglaty@gmail.com; phone: +79185916819; the department of computer aided design; graduate student.

Lebedeva Ekaterina Olegovna – e-mail: lbedevakate@mail.ru; phone: +79289591426; the department of computer aided design; graduate student.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.