



№3-2021

ISSN 1999-9429

# ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Алгоритмы обработки информации
- Электроника и нанотехнологии
- Связь, навигация и радиолокация
- Моделирование процессов и систем

# 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

№ 3 (220). 2021 г.

Тематический выпуск

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ИНЖЕНЕРИИ И УПРАВЛЕНИИ

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); Бородинский 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* Клевцов С.И.

*Технический редактор* Ярошевич Н.В.

*Оригинал-макет выполнен* Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 31.08.2021 г. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 18,4. Уч.-изд. л. – 15,7.

Заказ № 8138. 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. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

<b>М.С. Анферова, А.М. Белевцев</b> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СЕРВИСА ПОИСКА И МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИИ.....	6
<b>С.Н. Масаев</b> АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕТОДА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	18
<b>С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов</b> РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РАМКАХ КВАНТОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ.....	32
<b>Е.В. Пиневич, Д.С. Алтынов, В.С. Лисовский</b> ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР И СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ.....	42
<b>С.Г. Буланов</b> АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕСТКИХ СИСТЕМ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	54
<b>И.О. Шепель</b> АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ДААННЫХ В ОБЩУЮ КАРТУ ЗАНЯТОСТИ .....	64
<b>Хуссейн Ш. Мукер, И.И. Турулин</b> АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СИСТЕМЫ МАТЛАВ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ РЕКУРСИВНЫХ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА.....	72
<b>К.О. Север, И.И. Турулин, Д.А. Гужва</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СПОСОБОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ШУМА В ИЗОБРАЖЕНИИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАШУМЛЕННОСТИ.....	82
<b>Ю.А. Кравченко, А.М. Мансур, Ж.Х. Мохаммад</b> МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ СМЫСЛА СЛОВ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДАХ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ .....	92
<b>Д.А. Гужва, К.О. Север, А.А. Морозов</b> АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ .....	102

### РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ

<b>Ю.М. Богданов, А.Н. Зикий, А.И. Пустовалов</b> АТТЕНУАТОР С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ МОДУЛЯ M44752.....	114
<b>Е.Ю. Гусев, А.В. Сарыев</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ МАЛОИНВАЗИВНОГО НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА .....	121
<b>С.В. Малохатко, Д.А. Бакшевников, Е.Ю. Гусев</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ АНИЗОТРОПНОГО ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ .....	128

### РАЗДЕЛ III. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И РАДИОЛОКАЦИЯ

<b>А.Н. Зикий, А.С. Кочубей</b> ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕДАТЧИКА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН.....	135
<b>Д.Е. Чикрин, С.В. Голоусов</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ .....	142
<b>Ю.М. Мелёшин, В.И. Орешкин, К.С. Лялин</b> РАЗРАБОТКА АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ МИМО РАДАРА KU ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ.....	154

### РАЗДЕЛ IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

<b>А.И. Приходченко</b> ВЫБОР СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ СОГЛАСИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РАНГОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	164
<b>Хуанг Чун-Пинь</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	172
<b>Е.Р. Мунтян, Э.В. Мельник</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГРАФОВ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ РАЗНОТИПНЫМИ СВЯЗЯМИ .....	186
<b>О.Ю. Воронков</b> СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ».....	198

## CONTENT

### SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

<b>M.S. Anferova, A.M. Belevtsev</b> DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF INTELLIGENT SERVICE FOR INFORMATION SEARCH AND MONITORING .....	6
<b>S.N. Masaev</b> ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL THE DIGITAL TWIN OF THE ENTERPRISE .....	18
<b>S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov</b> DEVELOPMENT OF METHODS OF OPTIMIZATION AND PARALLELIZATION OF COMPUTATIONAL PROCESSES IN QUANTUM ACCELERATORS .....	32
<b>E.V. Pinevich, D.S. Altynov, V.S. Lisovsky</b> OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES AND COMPOSITION OF TRANSPORT SECURITY UNITS IN RAILWAY TRANSPORT.....	42
<b>S.G. Bulanov</b> STABILITY ANALYSIS OF RIGID SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS.....	55
<b>I.O. Shepel</b> ALGORITHM FOR COMPLEXING MULTIPLE DATA SOURCES INTO A SINGLE OCCUPANCY MAP.....	64
<b>Hussein Sh. Mogheer, I.I. Turulin</b> ANALYSIS OF MATLAB SYSTEM APPLICABILITY FOR SYNTHESIS OF CONTROLLED BUTTERWORTH DIGITAL RECURSIVE IIR FILTERS .....	72
<b>K.O. Sever, I.I. Turulin, D.A. Guzhva</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO FILTERING METHODS TO ELIMINATE NOISE IN AN IMAGE OF DIFFERENT DEGREES OF NOISE.....	83
<b>Yu.A. Kravchenko, A.M. Mansour, J.H. Mohammad</b> MODIFIED WORD SENSE DISAMBIGUATION METHOD BASED ON DISTRIBUTED REPRESENTATION METHODS .....	92
<b>D.A. Guzhva, K.O. Sever, A.A. Morozov</b> ANALYSIS OF THE CONTROLLABILITY OF SOME DIGITAL FILTERS WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE .....	102

### SECTION II. ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY

<b>Yu.M. Bogdanov, A.N. Zikiy, A.I. Pustovalov</b> ATTENUATOR WITH DIGITAL CONTROL BASED ON THE M44752 MODULE.....	114
<b>E.Yu. Gusev, A.V. Saryev</b> DESIGN OF SILICON MICROPROBE FOR MINIMALLY INVASIVE NEURAL INTERFACE.....	121
<b>S.V. Malokhatko, D.A. Bakshevnikov, E.Yu. Gusev</b> RESEARCH OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION ON ANISOTROPIC WET ETCHING OF MONOCRYSTALLINE SILICON .....	128

### SECTION III. COMMUNICATION, NAVIGATION AND RADAR

<b>A.N. Zikiy, A.S. Kochubey</b> MASTER GENERATOR OF CENTIMETER-WAVE INTERFERENCE TRANSMITTER.....	135
<b>D.E. Chickrin, S.V. Golousov</b> OPTIMIZATION-BASED CALIBRATION OF MEMS NAVIGATION SYSTEM.....	143
<b>Yu.M. Meleshin, V.I. Oreshkin, K.S. Lyalin</b> DESIGN OF AN ANTENNA SYSTEM FOR A KU-BAND MIMO RADAR.....	154

#### SECTION IV. MODELING OF PROCESSES AND SYSTEMS

<b>A.I. Prikhodchenko</b>	
SELECTION OF A STATISTICALLY OPTIMAL CRITERION FOR THE AGREEMENT OF A UNIFORM DISTRIBUTION FOR RANK SIGNAL PROCESSING UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY .....	164
<b>Jyun-Ping Huang</b>	
MODELING OF THE VACUUM INFUSION PROCESSES IN THE MANUFACTURING OF THE LARGE POLYMERIC COMPOSITE STRUCTURES .....	173
<b>E.R. Muntyan, E.V. Melnik</b>	
INVESTIGATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS BASED ON GRAPHS WITH MULTIPLE EDGES OF DIFFERENT TYPES .....	186
<b>O.Yu. Voronkov</b>	
SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN ASTATIC CONTROLLER FOR THE "FLYING PLATFORM" CONTROL SYSTEM.....	199

## Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-6-17

**М.С. Анферова, А.М. Белевцев**

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СЕРВИСА ПОИСКА И МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИИ

*Описана проблема стратегического анализа и выбора направлений развития инновационного предприятия в условиях перехода к 6 технологическому укладу и индустрии 4.0. В данных условиях поисково-аналитическая обработка информации не может быть полноценно выполнена без применения автоматизированных информационно-аналитических систем, в том числе и на базе искусственного интеллекта. В ходе анализа были определены основные приоритетные функции, которые должны обеспечивать разрабатываемые сервисы. Обозначены основные трудности при разработке данных сервисов, такие как: предварительная обработка данных и автоматизированная проверка актуальности баз данных. Для эффективного решения поставленных задач сервис интеллектуального мониторинга и поиска информации должен использовать комплексный подход с учетом эффективности применения методов для отдельных подзадач, обеспечивать высокую эффективность реализации всех этапов процедуры интеллектуального мониторинга. В связи с этим в данной работе описывается не только разработка общего интеллектуального поискового алгоритма, но и отдельные блок-алгоритмы, необходимые для обеспечения приоритетных функций разрабатываемого сервиса. В работе представлены следующие алгоритмы: алгоритм информационного поиска, необходимый для решения задачи полнотекстового поиска документов в пределах базы информационных ресурсов информационно-аналитического комплекса; алгоритм процедуры внесения новых документов; алгоритм предварительной обработки данных, включающий в себя стемминг и удаление знаков препинания для последующего анализа текста; алгоритм оценки ранжирования и релевантности информации, включающий в себя векторизацию документов; алгоритм кластеризации результатов поиска информации на основе нейронной сети Кохонена; алгоритм проверки актуальности информации - проверка соответствия локальной копии документа актуальной версии на веб-ресурсе источника. Предложен и обоснован язык программирования Python для реализации представленного алгоритма. Система обеспечивает автоматизированный непрерывный мониторинг с высокой периодичностью отправки запроса без участия оператора, что повысит качество и эффективность информационного поиска в условиях большого объема неструктурированной информации.*

*Технологические тренды; мониторинг; искусственный интеллект; Big Data; алгоритм; распознавание текста; кластеризация.*

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

### DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF INTELLIGENT SERVICE FOR INFORMATION SEARCH AND MONITORING

*This paper describes the problem of strategic analysis and the choice of directions for the development of an innovative enterprise in the conditions of transition to the 6th technological order and industry 4.0. In these conditions, search and analytical processing of information cannot be fully performed without the use of automated information and analytical systems, including those based on artificial intelligence. During the analysis, the main priority functions that the developed services should provide were identified. The main difficulties in the development of these services are: pre-processing of data and automated checking of the relevance of databases. To effectively solve the*

*tasks set, the intelligent monitoring and information retrieval service should use an integrated approach, taking into account the effectiveness of applying methods for individual subtasks, and ensure high efficiency of implementing all stages of the intelligent monitoring procedure. In this regard, this paper describes not only the development of a general intelligent search algorithm, but also individual block algorithms necessary to ensure the priority functions of the service being developed. The paper presents the following algorithms: an information search algorithm necessary to solve the problem of full-text search of documents within the database of information resources of the information and analytical complex; an algorithm for the procedure for entering new documents; an algorithm for pre-processing data that includes stemming and removing punctuation marks for subsequent text analysis; an algorithm for evaluating the ranking and relevance of information, including vectorization of documents; an algorithm for clustering information search results based on the Kohonen neural network; the algorithm for checking the relevance of information is to check whether the local copy of the document corresponds to the current version on the source's web resource. The Python programming language for the implementation of the presented algorithm is proposed and justified. The system provides automated continuous monitoring with a high frequency of sending a request without the participation of an operator, which will increase the quality and efficiency of information search in conditions of a large volume of unstructured information.*

*Technological trends; monitoring; search robot; artificial intelligence; Big Data; algorithm; text recognition; clustering.*

**Введение.** Проблема мониторинга и стратегического анализа информации в сетях общего и специального назначения постоянно усложняется.

Это обусловлено экспоненциальным ростом объемов информации (Big Data) [1], ее разнородностью, в том числе и по форме представления, отсутствием структурированности и высокой динамикой обновления.

В этой связи создание новых технологий мониторинга, обеспечивающих эффективность, полноту и высокий уровень релевантности информационного поиска является актуальным [2, 3].

Решение данной задачи может быть получено на основе создания на основе создания интеллектуальных поисковых роботов для распознавания и кластеризации неструктурированной информации в информационно-аналитических комплексах [4].

При этом общая концепция технологии подобного сервиса должна быть основана на комплексном подходе, обеспечивающего как синергетический эффект, так и высокую эффективность реализации отдельных этапов процедуры интеллектуального мониторинга.

Проведенный анализ исследовательских проектов [5] позволил выделить следующие приоритетные функции, которые должны обеспечивать разрабатываемые сервисы:

Ф1. Формирование поискового образа на основе методов теории исчисления предикатов с использованием ключевых слов и метаданных.

Ф2. Полнотекстовый поиск документов в пределах базы информационных ресурсов информационно-аналитического комплекса.

Ф3. Поиск документов, семантически близких к заданным эталонам в пределах рассматриваемой предметной области.

Ф4. Кластеризация найденных документов с целью упрощения их дальнейшего восприятия и фильтрации аналитиком.

Ф5. Автоматизированная проверка актуальности базы информационных ресурсов с целью реализации задачи непрерывного мониторинга.

При этом наибольшую сложность представляют собой следующие взаимосвязанные проблемы:

◆ предварительная обработка данных и формирование первичной коллекции (Ф1-Ф4);

◆ автоматизированная проверка актуальности базы информационных ресурсов с целью реализации задачи непрерывного мониторинга (Ф5).

**Основная часть.** Общая процедура алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации будет представлять собой совокупность нескольких отдельных блоков-алгоритмов (рис. 1).

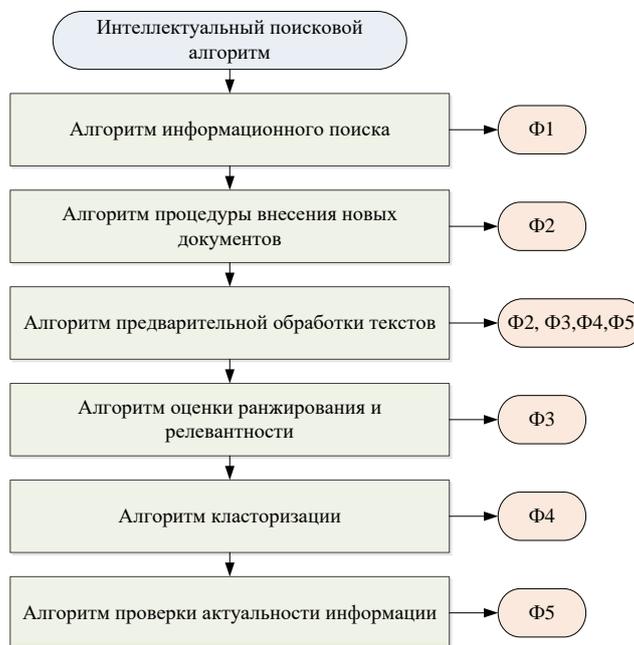


Рис. 1. Общая процедура алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации

Для реализации представленного алгоритма предлагается использовать язык программирования Python. Это обусловлено следующими факторами:

- ◆ простым и удобным интерфейсом;
- ◆ большим количеством специализированных библиотек для работы с сайтами, текстами и анализа, такие как ScikitLearn, NLTK, Gensim, spaCy, NetworkX и Yellowbrick.

**1. Разработка алгоритма информационного поиска.** Для решения задачи полнотекстового поиска документов в пределах базы информационных ресурсов информационно-аналитического комплекса в первую очередь необходимо составить полнотекстовый поисковый индекс для разрабатываемого сервиса.

Для поиска некоторого элемента в хранилище данных по заданному запросу потребуется время, пропорциональное количеству элементов в данном хранилище. Индекс, представляя собой структурированный, а не хаотический набор данных, позволяет осуществлять доступ на порядок быстрее.

Существует два основных типа поискового индекса [6]:

1. Прямой индекс.
2. Инвертированный индекс.

Для решения поставленной задачи удобно использовать инвертированный индекс, дополнив его весом слова в документе, так как инвертированный индекс хранит список документов, содержащих каждое слово, поисковая система может использовать прямой доступ, чтобы найти документы, связанные с каждым словом в запросе, и быстро получить их.

В качестве меры взвешивания слова можно воспользоваться F-мерой, а именно precision (точность) и recall (полнота) – это метрики, которые используются при оценке большей части алгоритмов извлечения информации [7]. Суть точности и полноты таких мер очень проста.

Точность системы в пределах класса – это доля документов, действительно принадлежащих данному классу относительно всех документов, которые система отнесла к этому классу. Полнота системы – это доля найденных классификатором документов, принадлежащих классу относительно всех документов этого класса в тестовой выборке.

Эти значения легко рассчитать на основании таблицы контингентности (табл. 1), которая составляется для каждого класса отдельно [8].

Таблица 1

Таблица контингентности

Категория i		Экспертная оценка	
		положительная	отрицательная
Оценка системы	Положительная	TP	FP
	Отрицательная	FN	TN

В таблице содержится информация, сколько раз система приняла верное и сколько раз неверное решение по документам заданного класса.

Точность и полнота определяются следующим образом [9]:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

где TP – истинно-положительное решение; TN – истинно-отрицательное решение; FP – ложно-положительное решение; FN – ложно-отрицательное решение.

В практическом применении значения точности и полноты удобнее рассчитывать с использованием матрицы неточностей (confusion matrix). В случае если количество классов относительно невелико (не более 100–150 классов), этот подход позволяет наглядно представить результаты работы классификатора.

Матрица неточностей (рис. 2) – это матрица размера N на N, где N – это количество классов. Столбцы этой матрицы резервируются за экспертными решениями, а строки за решениями классификатора. Когда мы классифицируем документ из тестовой выборки мы инкрементируем число, стоящее на пересечении строки класса, который вернул классификатор и столбца класса, к которому действительно относится документ.



Рис. 2. Матрица неточностей (26 классов, результирующая точность – 0.8, результирующая полнота – 0.91)

Проведенный анализ показал, что классификатор определяет верно большинство документов. Диагональные элементы матрицы явно выражены. Тем не менее, в рамках некоторых классов (3, 5, 8, 22) классификатор показывает низкую точность.

Получив такую матрицу точности и полноты для каждого класса, последующие расчеты упрощаются. Точность равняется отношению соответствующего диагонального элемента матрицы и суммы всей строки класса. Полнота – отношение диагонального элемента матрицы и суммы всего столбца класса может быть представлена в следующем виде:

$$\text{Precision}_c = \frac{A_{c,c}}{\sum_{i=1}^n A_{c,i}}. \quad (3)$$

Тогда результирующая точность классификатора рассчитывается как арифметическое среднее его точности по всем классам. Аналогично с полнотой. Технически этот подход называется macro-averaging [10].

$$\text{Recall}_c = \frac{A_{c,c}}{\sum_{i=1}^n A_{i,c}} \quad (4)$$

Возникает проблема поиска баланса между максимальной точностью и полнотой. Для решения данной проблемы вводится метрика F-мера. С ее помощью будет проще принимать решение о том, какую реализацию запускать дальше (production).

F-мера представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремится к нулю [11].

$$F = 2 \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (5)$$

Данная формула придает одинаковый вес точности и полноте, поэтому F-мера будет падать одинаково при уменьшении и точности и полноты. Возможно рассчитать F-меру придав различный вес точности и полноте.

$$F = (\beta^2 + 1) \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\beta^2 \text{Precision} + \text{Recall}}, \quad (6)$$

где  $\beta$  принимает значения в диапазоне  $0 < \beta < 1$  если вы хотите отдать приоритет точности, а при  $\beta > 1$  приоритет отдается полноте. При  $\beta = 1$  формула сводится к предыдущей, и получается сбалансированная F-мера (рис. 3–5).

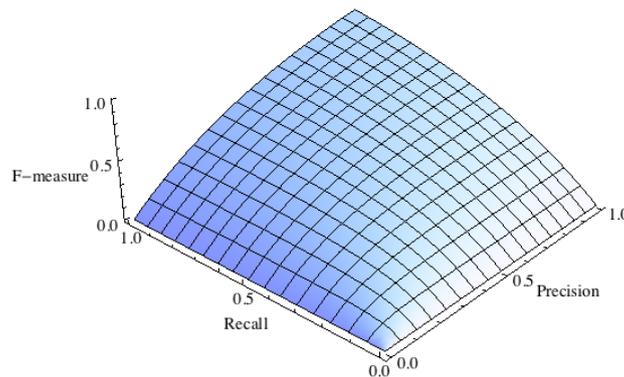


Рис. 3. Сбалансированная F-мера

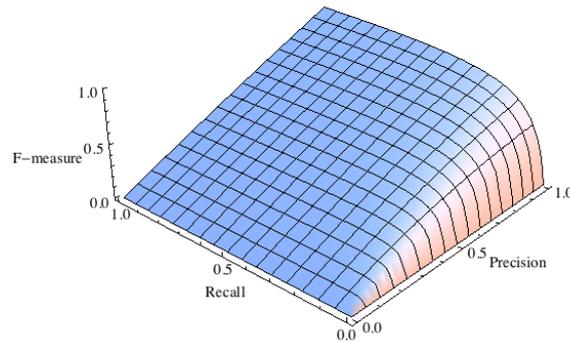


Рис. 4. F-мера с приоритетом точности ( $\beta^2 = \frac{1}{4}$ )

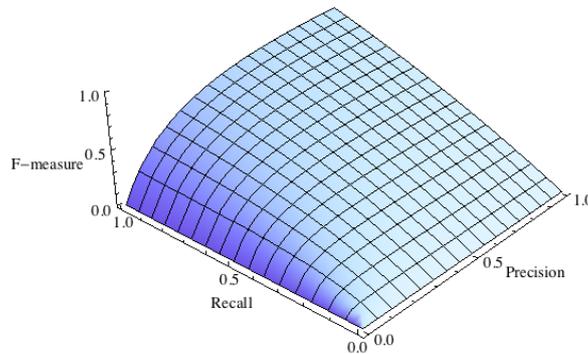


Рис. 5. F-мера с приоритетом полноты ( $\beta^2 = 2$ )

Проведенный анализ показал, что F-мера сводит к одному числу две других основополагающих метрики: точность и полноту, поэтому ее можно использовать как формальную метрику оценки качества классификатора.

**2. Алгоритм процедуры внесения новых документов.** Все документы, хранящиеся в базе данных информационно-аналитического комплекса, должны быть проиндексированы с использованием алгоритмов нормализации текста. Полученный таким образом индекс будет основой информационного поиска.

Принципиальный алгоритм процедуры внесения новых документов представлен на рис. 6.

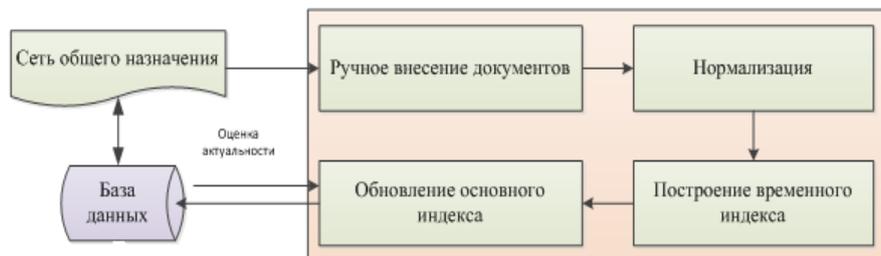


Рис. 6. Алгоритм процедуры внесения новых документов

**3. Предварительная обработка данных.** Предварительная обработка текста включает в себя такие следующие операции:

- ◆ Стемминг (stemming).
- ◆ Удаление знаков препинания.

Стемминг – это нахождение основы слова (стеммы), передающей его лексическое значение [12].

Проведенный анализ показал, что в базах данных преимущественно информация хранится в виде HTML документов.

Разметка HTML, которая сама по себе структурирована, может производиться и отображаться множеством иногда беспорядочных способов. Это связано с тем, что в сети Интернет веб-страницы не обязаны структурироваться в строгом соответствии с каким-то набором стандартов. В связи с данной непредсказуемостью возникает проблема извлечения данных из HTML документов методичным и предсказуемым способом.

Тогда алгоритм предварительной обработки текстов может быть представлен в виде следующего алгоритма (рис. 7).



Рис. 7. Алгоритм предварительной обработки текстов

**4. Разработка алгоритма оценки ранжирования и релевантности.** Для сравнения документов между собой математическими методами, необходимо провести их векторизацию.

Такую матрицу можно получить при помощи класса CountVectorizer из библиотеки scikit-learn.

Вес терма («важность» слова для идентификации данного текста) в документе можно определить разными способами. Если в разрабатываемом поисковом сервисе за меру веса терма берем меру TF-IDF, то это позволит нам использовать поисковый индекс в качестве кэша для хранения векторов документов.

TF (term frequency – частота слова) – отношение числа вхождений некоторого слова к общему числу слов документа. Таким образом, оценивается важность слова  $t_i$  в пределах отдельного документа.

$$TF(t, d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}, \quad (7)$$

где  $n_t$  – число вхождений слова  $t$  в документ, а в знаменателе – общее число слов в данном документе.

Релевантность в информационном поиске – это семантическое соответствие поискового запроса полученному документу [13].

Введем понятие формальной релевантности – соответствие, определяемое путём сравнения образа поискового запроса с поисковым образом документа.

Одним из методов для оценки релевантности является TF-IDF-метод [14].

Проведенный анализ показал, что целесообразно использовать данный метод в основе алгоритма оценки релевантности и ранжирования предлагаемого интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации, так как обеспечивается функция ранжирования соответствующих поисковому запросу документов по увеличению метрики TF-IDF.

**5. Разработка алгоритма кластеризации результатов поиска.** Следующим этапом разрабатываемого сервиса является кластеризация – процесс объединения в группы объектов, обладающих схожими признаками [15].

Применительно к задаче анализа данных, метод кластеризации используется для кластерного анализа – многомерной статистической процедуры, выполняющей сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, и затем упорядочивающей объекты в сравнительно однородные группы [16].

Проведенный мониторинг показал, что существует несколько основных подходов разбиения групп объектов на кластеры:

1. Вероятностный подход.
2. Подходы на основе систем искусственного интеллекта:
3. Логический подход. Построение дендрограммы осуществляется с помощью дерева решений.
4. Иерархический подход. Предполагается наличие вложенных групп (кластеров различного порядка).

Проведенный анализ показал, что в настоящее время наиболее высокой интенсивностью исследований обладают методы искусственного интеллекта [17, 18]. Так же кластеризация с помощью методов искусственного интеллекта основана на подобии образов: нейронная сеть размещает близкие образы в один кластер [19].

В этой связи для решения поставленных задач предлагается использовать подходы на основе систем искусственного интеллекта. В качестве простейшего примера можно привести алгоритм на основе нейронной сети Кохонена (рис. 8).

**6. Разработка алгоритма оценки актуальности.** Организация мониторинга инновационного потенциала играет особо значимую роль в процессе обеспечения устойчивого развития предприятий. Это предусматривает многоаспектное исследование по выявлению тенденций и перспектив дальнейшего развития предприятия. Мониторинг инновационного потенциала позволяет провести анализ и прогнозирование доходности изменений структуры объектов интеллектуальной собственности, инновационного развития, а также платежеспособности, ликвидности, финансовой устойчивости и деловой активности предприятия.

Под оценкой актуальности в данной работе понимается проверка соответствия локальной копии документа актуальной версии на веб-ресурсе источника. Предлагаемый алгоритм работает посредством программы-робота, автоматически в фоновом режиме проходящей по коллекции документов и проверяющей первоисточники документов на предмет обновления (рис. 9).

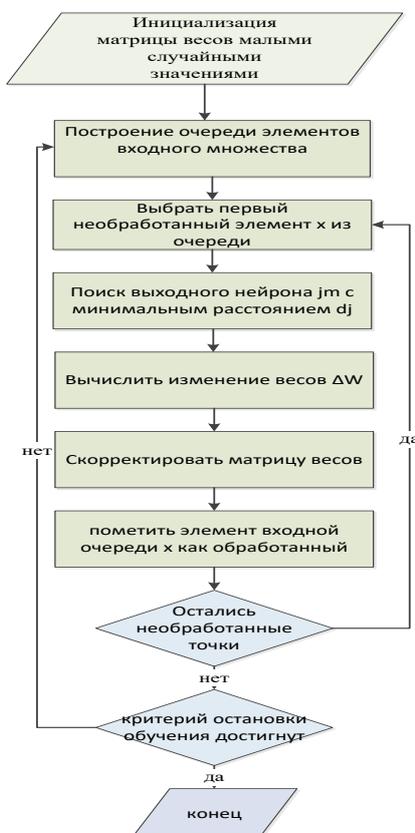


Рис. 8. Алгоритм кластеризации

Необходимость данного функционала обусловлена высокой степенью важности своевременного обнаружения обновлений при работе стратегическом анализе инновационных направлений развития предприятий.



Рис. 9. Алгоритм проверки актуальности информации

**Выводы.** Предлагаемый интеллектуальный сервис поиска и мониторинга информации реализован в информационно-аналитическом комплексе АРМ Аналитика [20]. Внедрение данного алгоритма позволило сократить общее время поиска информации в 5–6 раз по отношению к запросам, формируемым в поисковых системах общего назначения.

Предложенная процедура формирует первичную коллекцию на основе интеллектуального поиска информации в заданной предметной области, что позволяет существенно повысить релевантность поиска и обработки информации, в отличие от систем глобального мониторинга, поиск которых основан на индикаторах: рост использования ключевых слов, увеличение численности новых авторов, цитирование работ из смежных областей.

Системное программное обеспечение на основе предложенного алгоритма может быть использовано при создании интеллектуальных сервисов и существенно повысить релевантность поиска и обработки информации в информационно-аналитическом комплексе стратегического анализа инновационных направлений развития предприятия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Балыбердин В.А.* Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // *Наукоёмкие технологии.* – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.
2. *Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А.* Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 3 (164). – С. 35-45.
3. *Микова Н.С., Соколова А.В.* Мониторинг глобальных технологических трендов: теоретические основы и лучшие практики // *Форсайт.* – 2014. – Т. 8, № 4.
4. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения // *Матер. III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства».* – Рязань: РГРТУ, 2018.
5. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Поисковые роботы для автоматизированного мониторинга информации в сетях общего и специального назначения // *18-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством».* – 2019.
6. *Jacob Devlin and Ming-Wei Chang.* Research Scientists, Google AI Language: Open Sourcing BERT: State-of-the-Art Pre-training for Natural Language Processing (англ.). – Google, Inc, 2018.
7. *Charles L. Clarke A., Gordon V. Cormack* Dynamic Inverted Indexes for a Distributed Full-Text Retrieval System // *MultiText Project Technical Report MT-95-01.* – University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada, 1995.
8. *Павлов Ю.Н., Майструк К.А.* Сравнение методов оценки тональности текста // *Молодой ученый.* – 2016. – № 12 (116). – С. 59-64.
9. *Olson David L, and Delen, Dursun.* Advanced Data Mining Techniques. – Springer, 1st edition (February 1, 2008). – 2008. – 138 p.
10. *Manning C., Raghavan P., Schütze H.* Introduction to Information Retrieval. – Cambridge University Press, 2008.
11. *Powers, David M.W.* Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation // *Journal of Machine Learning Technologies.* – 2011. – No. 2 (1). – P. 37-63.
12. *Lovins Julie Beth.* Development of a Stemming Algorithm // *Mechanical Translation and Computational Linguistics.* – 1968. – Vol. 11.
13. *Словарь по кибернетике / под ред. академика В.С. Михалевича.* – 2-е. изд. – Киев: Гл. ред. Украинской советской энциклопедии им. М.П. Бажана, 1989. – 751 с.
14. *Salton G. and Buckley C.* Term-weighting approaches in automatic text retrieval // *Information Processing & Management.* – 1988. – Vol. 24 (5). – P. 513-523.

15. Айвазян С.А., Бухитабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
16. Бериков В.С., Лбов Г.С. Современные тенденции в кластерном анализе // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – 2008. – 26 с.
17. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения // Матер. III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2018.
18. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объёма неструктурированной информации // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием им. профессора О.Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КомТех-2020».
19. Эндрю М. Реальная жизнь и искусственный интеллект // Новости искусственного интеллекта. РАИИ, 2000.
20. Белевцев А.М., Бальбердин В.А., Белевцев А.А., Садреев Ф.Г. О разработке интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Научные технологии. – 2019. – № 3.

## REFERENCES

1. Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Belevtsev A.A., Balyberdin V.A. Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [High-tech technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
2. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A. Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommunikatsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of the directions of development of nano-and IT-technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3 (164), pp. 35-45.
3. Mikova N.S., Sokolova A.V. Monitoring global'nykh tekhnologicheskikh trendov: teoreticheskie osnovy i luchshie praktiki [Monitoring global technological trends: theoretical foundations and best practices], *Forsayt* [Foresight], 2014, Vol. 8, No. 4.
4. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz napravleniy sozdaniya algoritmov effektivnogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Analysis of the directions of creating algorithms for effective information search in general and special purpose networks], *Mater. III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference "Actual problems of modern science and production"]. Ryazan': RGRТУ, 2018.
5. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Poiskovye roboty dlya avtomatizirovannogo monitoringa informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Search robots for automated monitoring of information in general and special purpose networks], *18-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [18th International Scientific and Practical Conference "Quality Management"], 2019.
6. Jacob Devlin and Ming-Wei Chang. Research Scientists, Google AI Language: Open Sourcing BERT: State-of-the-Art Pre-training for Natural Language Processing (англ.). Google, Inc, 2018.
7. Charles L. Clarke A., Gordon V. Cormack Dynamic Inverted Indexes for a Distributed Full-Text Retrieval System, *MultiText Project Technical Report MT-95-01. University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada, 1995.*
8. Pavlov Yu.N., Maystruk K.A. Sravnenie metodov otsenki tonal'nosti teksta [Comparison of methods for assessing the tonality of the text], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2016, No. 12 (116), pp. 59-64.
9. Olson David L, and Delen, Dursun. Advanced Data Mining Techniques. Springer, 1st edition (February 1, 2008), 2008, 138 p.

10. Manning C., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press, 2008.
11. Powers, David M.W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation, *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, No. 2 (1), pp. 37-63.
12. Lovins Julie Beth. Development of a Stemming Algorithm, *Mechanical Translation and Computational Linguistics*, 1968, Vol. 11.
13. Slovar' po kibernetike [Dictionary of Cybernetics], ed. by akad. V.S. Mikhalevicha. 2nd. ed. Kiev: Gl. red. Ukrainy sovetskoy entsiklopedii im. M.P. Bazhana, 1989, 751 p.
14. Salton G. and Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval, *Information Processing & Management*, 1988, Vol. 24 (5), pp. 513-523.
15. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti [Applied statistics: Classification and dimension reduction]. Moscow: Finansy i statistika, 1989, 607 p.
16. Berikov V.S., Lbov G.S. Sovremennye tendentsii v klasternom analize [Modern trends in cluster analysis], *Vserossiyskiy konkursnyy otbor obzorno-analiticheskikh statey po prioritetnomu napravleniyu «Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy»* [All-Russian competitive selection of review and analytical articles in the priority direction "Information and telecommunications systems"], 2008, 26 p.
17. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz napravleniy sozdaniya algoritmov effektivnogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Analysis of the directions of creating algorithms for effective information search in general and special purpose networks] *Mater. III Vseros-siyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference "Actual problems of modern science and production"]. Ryazan': RGRTU, 2018.
18. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz napravleniy razvitiya tekhnologiy monitoringa v usloviyakh bol'shogo ob"ema nestruturirovannoy informatsii [Analysis of trends in the development of monitoring technologies in the conditions of a large volume of unstructured information], *XXIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem im. professora O.N. P'yavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2020»* [XXIV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O. N. P'yavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management ""Comtech-2020""].
19. Endryu M. Real'naya zhizn' i iskusstvennyy intellekt [Real life and artificial intelligence], *Novosti iskusstvennogo intellekta*, RAI, 2000.
20. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. O razrabotke intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [On the development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [High-tech technologies], 2019, No. 3.

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

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

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

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

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

**С.Н. Масаев**

### **АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕТОДА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Возрастает объем обрабатываемой информации при анализе и управлении деятельностью предприятия как системы. Объем обрабатываемой информации напрямую зависит от размерности этой системы. В работе деятельность предприятия формализуется как цифровой двойник предприятия. Цифровой двойник предприятия анализируется как динамическая система. Выполнена идентификация предприятия как динамическая система. Цифровой двойник предприятия формализован как балансовая модель В. Леонтьева. Создан алгоритм оптимального управления цифровым двойником предприятия. В качестве параметров оптимального управления рассмотрены функции: траектория системы, время выполнения алгоритма и показатель состояния системы. В алгоритме для управления предприятием использованы методы: таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ и Национальные квалификационные рамки РФ. Идентификация процессов предприятия выполнена способом, на который получен патент. Алгоритм выполнен в авторском комплексе программ для анализа системы размерностью 1,2 млн. значений. Исследование показало существенные изменения значений функций оптимального управления, характеризующих состояния динамического объекта в зависимости от выбранных методик. Расчеты показали, как влияет выбор методики управления на оптимальность решений. Отображено состояние предприятия через компетенции персонала: психомоторные, когнитивные и аффективные. Установлено, что при низких когнитивных и аффективных способностях персонала начинает преобладать психомоторная деятельность, мало приводящая к результату. С ростом когнитивных способностей персонала психомоторная деятельность становится более адекватной на внутренние задачи и влияние параметров внешней среды. Через интегральный показатель выполнена оценка внедрения методик в управление предприятием. Выполнена оценка оптимальности решения управления цифровым двойником предприятия как динамической системой.*

*Теория управления; цифровой двойник предприятия; динамическая система; параметры внешней среды; оптимальное управление; алгоритм; методики.*

**S.N. Masaev**

### **ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL THE DIGITAL TWIN OF THE ENTERPRISE**

*The volume of processed information increases when analyzing and control the activities of an enterprise as a system. The amount of processed information directly depends on the dimension of this system. In the work, the activity of the enterprise is formalized as a digital twin of the enterprise. The digital twin of the enterprise is analyzed as a dynamic system. The enterprise was identified as a dynamic system. The digital twin of the enterprise is formalized as V. Leontiev's balance model. An algorithm for optimal control of the digital twin of the enterprise has been created. The following functions are considered as parameters of optimal control: the trajectory of the system, the execution time of the algorithm and the indicator of the state of the system. In the algorithm for enterprise control, the following methods were used: Bloom's taxonomy, the competence of graduates in the SFU specialties and the National Qualifications Framework of the Russian Federation. The identification of the enterprise processes is carried out by the method for which the patent has been obtained. The algorithm is implemented in the author's software package for analyzing a system with a dimension of 1.2 million values. The study showed significant changes in the values of the optimal control functions characterizing the states of a dynamic object, depending on the selected techniques. Calculations have shown how the choice of control method affects the optimality of decisions. The state of the enterprise is displayed through the competencies of the personnel: psychomotor, cognitive and affective. It was found that with low cognitive and affective abilities of the staff, psychomotor activity begins to prevail, which leads to little result. With the growth of the cognitive abilities of the*

*personnel, psychomotor activity becomes more adequate to the internal tasks and the influence of the parameters of the external environment. An integral indicator was used to assess the implementation of methods in enterprise control. The estimation of the optimality of the solution for control the digital twin of the enterprise as a dynamic system is carried out.*

*Control theory; digital twin of an enterprise; dynamic system; parameters of the external environment; optimal control; algorithm; methods.*

**Введение.** С развитием цифровых технологий создание цифрового двойника предприятия становится все более актуальным направлением. Создание цифровой копии предприятия подразумевает идентификацию всех выполняемых им производственных, вспомогательных и административных процессов. Самые сложные процессы для идентификации являются административные, так как они слабо формализуемые и трудно прогнозируемые. Стоит отметить, что административные процессы одни из самых сложных в изучении для автоматизации и в других областях теории управления.

Для достижения точности управления необходимо изучаемое предприятие представить как систему, которая характеризуется процессами. Для установления взаимосвязи административных процессов между собой и со всем остальными требуется значительное время. Например, если тратить на описание одного процесса со всеми начальными около 2 минут, то на описание около 350 процессов уйдет 2 месяца, на описание 2 000 процессов уже уйдет 5 лет, а на описание 11,5 млн процессов уже потребуются 25 тысяч лет. Следовательно, мы имеем существенное ограничение, неопределимое в рамках одной человеческой жизни, на управление системой из-за увеличения размерности системы.

Цель статьи: выполнить оптимальное управление предприятием через его цифровой двойник.

Достижение поставленной цели возможно через следующие задачи:

- ◆ идентификация предприятия как динамической системы;
- ◆ создание цифрового двойника предприятия;
- ◆ создание алгоритма оптимального управления цифровым двойником предприятия.

Классическими в анализе динамических систем считаются работы авторов: J.V. Poncelet, братья Siemens Werner & Wilhelm, J.C. Maxwell, E.J. Routh, H. Poincare, A. Stodola, A. Hurwitz, И. А. Вышнеградский, П.Л. Чебышев, А.М. Ляпунов, N. Wiener, L.A. Mac-Coll, H. Bode, W. Shannon, St. Beer, W.-R. Ashby, R. Bellman, R. Kalman, E.I. Jury, J.T. Tou, И.Е. Жуковский, Н.Г. Четаев, И.Н. Вознесенский, А.А. Андронов, Г.В. Шипанов, А.И. Лурье, Н.Н. Красовский, Л.С. Понтрягин, А.М. Летов, А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, А.А. Красовский, В.А. Якубович и др. [1–15].

Классическими в анализе управления предприятием считаются работы авторов: В.В. Леонтьева, С.А. Айвазяна, И.В. Елохова, Г. Б. Клейнер, А.Г. Гранберг, В.Ф. Кротов, А.Г. Аганбегян, Р. Солоу, К. Эрроу, A. Schminke, J. Van Biesebroeck [16–21].

**Метод.** В качестве модели предприятия, как системы, будем использовать балансовую модель В. Леонтьева [16]. В матричной форме система имеет вид

$$X = AX + Y, \quad (1)$$

где

$X = (X^1, X^2, \dots, X^n)^T$  – вектор сумм единиц ресурса в группе  $X^n$  процессов  $x_j^i = [i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n]$  (количество единиц ресурсов из  $i$  процесса на создание ресурса  $j$  процесса);

$Y = (Y^1, Y^2, \dots, Y^n)^T$  – вектор сумм единиц дополнительного ресурса  $Y^n$  привлеченного со стороны на предприятие процессами  $X^n$ ;

$A = (a_j^i), i, j = \overline{1, n}$ , – коэффициенты матрицы взаимодействия процессов  $x_j^i$ .

Из модели предприятия (1) следует две задачи: наблюдения  $(E - A)X = Y$  ( $E$  – единичная матрица) и управления  $(E - A)^{-1}Y = X$ . Вторую задачу управления решают через оптимизационный метод [22].

Стоит отметить, что модель предприятия (1) можно расширить до модели предприятия с управлением по аналитическим оценкам с учетом отклонений достижения цели при влиянии параметров внешней среды, матрицей структуры объекта, матрицы метода управления и матрицы наблюдения. Эффективность управления предприятием более сложной моделью представлена в отдельной работе [23]. Через более сложную модель возможно регулировать количество параметров для наблюдения, но для этого надо выполнить полную идентификацию процессов предприятия в каждый момент наблюдения, т.е. эффективность использования оптимизационного метода в модели (1) зависит от точности идентификации процессов  $x_j^i$ .

Идентификация объекта как системы выполняются следующим способом [24]. Есть цифровая копия предприятия  $M$ , где  $v (v \in M)$  его процессы с именем из словаря методики управления, образованные от

$$v = (x, y), \quad (2)$$

где  $V$  – наименование процесса по методике управления,  $x \in X$ ,  $y \in Y$  процессы соответствующих групп процессов  $X$  и  $Y$ .

Процесс  $x_j^1$ , далее для удобства будем использовать обозначение  $x^1$ , является процессом цифровой копии предприятия  $M_x$ , так как имеем результат его работы  $y^1$  и  $(x^1, y^1) \in M$ . Процесс  $x^2$  не относится к цифровой копии предприятия  $M$  всех процессов, если отсутствует точка  $y^2 \in Y$ .

Деятельность цифровой копии предприятия  $M$  задается и оптимизируется через функционал  $\oint$  в паре точек  $v = (x, y)$  по процессам, т.е. задает  $v \in M$  и ставит в соответствие действительное число  $\oint_v$  – площадь фигуры.

Тогда цифровой двойник предприятия представлен  $x$  вектором  $n$ -мерного векторного пространства  $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ ,  $x \in X$  пространства состояния системы  $X$ . Соответственно деятельность цифровой копии предприятия представляется динамической системой  $S = \{T, X\}$  с траекторией  $x(t) = (x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t))$ , где  $t = [t_0, t_0 + 1, \dots, T]$  – моменты времени,  $t_0$  – начальный момент времени, а  $t_1$ ,  $T$  – момент окончания работы.

Векторная форма

$$x(t+1) = f(t, x(t), u(t))$$

или

$$x^i(t+1) = f^i(t, x(t), u(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

где  $u(t)$  – управление однозначно задает отвечающую ей траекторию без ограничений на правую часть уравнения (3), тем самым обеспечивается единственность решения (решение задачи Коши).

В  $t = 0$  (3) имеет вид  $x(1) = f(0, x_0, u(0))$ . Полученное значение  $x(1)$  и  $t = 1$  подставляем в (3) получаем  $x(2)$  и по  $T$  момент окончания работы  $x(T)$ . Траектория динамической системы по выбранному методу управления равна  $(x(t), u(t)) \in V^t$  для  $t$  где  $0 \leq t \leq T$ . Тогда оптимальное управление сводится к нахождению, через алгоритм, траектории процессов  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  цифровой копии предприятия  $M$ , на котором функционал  $\phi$  достигает минимального значения при необходимости минимизации затрат или максимального значения при привлечении ресурсов на предприятие (оптимизации детальности).

Из  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  следует, что  $u^*(t)$  – оптимальное управление оптимального процесса  $x^*(t)$ :

**Постановка задачи.** Предприятию через его цифровую копию  $M$ :

1. Найти оптимальную траекторию  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  по выбранной методике управления  $v^*$  с достижением условия  $\phi(v) \rightarrow \min_{v \in M} \phi(v)$ .

2. Найти минимизирующую последовательность  $\{v_s\} = \{x_s^*(t), u_s^*(t)\} \in M$  с достижением условия  $\phi(v^*) \rightarrow \inf_{v \in M} \phi(v)$ .

При этом  $\phi(v) = \int_0^T f^0(t, x, u) dt$  характеризует качество процесса,

$\phi(v) = F(x(T))$  характеризует время расчета алгоритма поиска оптимальной траектории,  $\phi(v) = G$  характеризует состояние предприятия через интегральный показатель [24].

**Алгоритм расчета.** 1 этап. Свидетельство ЭВМ № 2013614410. Выполнение процессов фиксируется как  $x^i(t)$  по способу [24]. Зафиксированные процессы

$x(t) = [x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)]^T \in X$  образуют пространство  $X$ , где  $n$  – количество процессов,  $T = \{t : t = 1, \dots, T_{\max}\}$  – период анализа. Смоделированное предприятие представляем цифровым двойником как многомерную динамическую систему  $S = \{T, X\}$ , Вычисляем интегральные показатели системы характеризующие ее состояние

$$G = \sum_{i=1}^{T=\max} \sum_{j=1}^n G_i(t), \quad R_i(t) = G_i(t) = \sum_{j=1}^n |r_{ij}(t)|,$$

$R_k(t) = \frac{1}{k-1} \overset{o}{X}_k^T(t) \overset{o}{X}_k(t) = \left\| \overset{o}{r}_{ij}(t) \right\|$ , где  $k$  – глубина расчета (в статье  $k=6$  месяцев),  $r_{ij}(t)$  – коэффициенты корреляции переменных  $x^i(t)$  и  $x^j(t)$  в момент времени  $t$ . Значение  $k$  возможно регулировать от 2 и до  $T-2$  [25]. Если идентифицированная система характеризует предприятие, то выполняем этап 2, иначе выполняем 1 этап.

2 этап. Свидетельство ЭВМ № 2017616973. В идентифицированной системе выбираем методику управления  $V$ , сопоставляя процессы  $x^i_j$  с наименованием процессов  $v_i^j$  методики. Соответственно методика управления определяется вектором на-

именований значений  $v(t) = [v^1(t), v^2(t), \dots, v^n(t)]^T \in V$  –  $n$  – размерностью. Деятельность системы ограничена ресурсами  $C$ , тогда  $V(X) \leq C$ . Все подпроцессы процессов системы имеют такое же ограничение. Если выбранный метод управления охватывает все процессы, то выполняем этап 3, иначе повторяем выполнение этапа 2. Управление системой возможно и без описания  $x^i(t)$  через контур управления. Если система идентифицирована  $\hat{\phi}(v) = G$  то выполняем этап 3, иначе 1 этап.

*3 этап.* Свидетельство ЭВМ № 2008610295. Проверяем управление на оптимальность. Если решение не оптимально по  $\hat{\phi}(v) \rightarrow \min_{v \in M} \hat{\phi}(v)$  и не устраивает нас, то возвращаемся на этап 1, иначе переходим к этапу 4.

*4 этап.* Свидетельство ЭВМ № 2017616970. Оцениваем эффективность управляющих воздействий  $\hat{\phi}(v) = \int_0^T f^0(t, x, u) dt$ . Если эффективность нас не устраи-

вает, то задаем новые управляющие воздействия от руководства предприятия и переходим к этапу 1, иначе конец алгоритма.

**Объект исследования.** Предприятие, используемое в качестве примера (как динамический объект) характеризуется производственными, обслуживающими и административными процессами. Производственные процессы включают в себя все технологические процессы на которые задействуются: основные средства, рабочие, товарно-материальные ценности и др. Вспомогательные процессы включают в себя основные средства, работников, товарно-материальные ценности задействованные на поддержания основных процессов производства. Первый год характеризуется процессами, когда создаются и закупается основные средства и нанимается персонал. Второй год характеризуется процессами, когда начинается формирование запасов сырья и материалов перед запуском основного производства. Третий год характеризуется процессами, когда выполняется запуск основного производства. Четвертый и пятый год характеризуются процессами, когда выполняется нормальная работа предприятия. Полное описание цифрового двойника в отдельной работе [26].

Методика управления  $V$  выбирается исходя из компетенций персонала осуществляющего работу на предприятии. В качестве управления можно задать 29 методик: классификатора целей [27], классификатора стратегий [28], стандарт информационной безопасности BS 7799-3-2006 [29], V-modell [30], Hermes [31], VZPM [32], PRINCE2 [33], DIN69901 [34], Bsi [35, 36], Межгосударственная система стандартов [37], КАНАРСПИ [38, 39], CAN-CSA [40], ANCSPI [41], Solow [20], PROMAT [42], P2M [43], жизненные циклы предприятия Ицхака Адизеса [44], Сто правил НАСА [45], должностные инструкции [46], компетенции выпускников СФУ [47], Универсальные компетенции [48], Дублинские Дескрипторы [49], Квалификационные Европейские Рамки [50, 51], Национальные Квалификационные Рамки [52], компетенции IPMA [53], компетенции РМВок [54], компетенции P2M [55], компетенции Hermes [56], Таксономия Блума [57, 58] и др.

В данной статье для управления цифровым двойником предприятия будем использовать методики: Таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ, Национальные квалификационные рамки РФ.

**Моделирование.** Идентифицированная размерность динамической системы (цифрового двойника  $M$ )  $n - 1,2$  млн. значений. Методика управления  $V$  – таксономия Блума. Расход ресурса в обычном режиме  $X$  или  $(x(t), u(t)) \in V'$  равен 5 641 442 единиц ресурса за пять лет.

Используя алгоритм процессов предприятия можно наблюдать по модели (1) в каждом месяце  $Y(t)$  компетенции персонала этого предприятия:  $v^1$  – когнитивные,  $v^2$  – аффективные,  $v^3$  – психомоторные,  $v^4$  – процессы, которые невозможно отнести к выбранной методике (рис. 1).



Рис. 1. Динамика компетенций персонала

Так как моделируется деятельность предприятия с момента его создания, то у персонала первые 8 месяцев больше тратится ресурсов на психомоторные компетенции  $v^3$ , которые носят менее осознанный характер. В 4 и 6 периодах психомоторные компетенции  $v^3$  требуют все меньше ресурсов, а аффективные  $v^2$  и когнитивные  $v^1$  компетенции требуют больше ресурсов. Значит с ростом умственных способностей персонала предприятия снижается количество бесполезного физического труда.

Во всех периодах наблюдается снижение затрат на  $v^2$  аффективные компетенции при росте затрат ресурсов на  $v^3$  когнитивные компетенции персонала. Значит с ростом умственных способностей у персонала несознательная (аффективная) деятельность снижается. С каждым годом когнитивные способности персонала возрастают.

На третий год когда предприятие запускает основное производство наблюдается рост психомоторных  $v^3$ , когнитивных  $v^1$  и аффективных  $v^2$  компетенций.

После 34 периода когнитивные способности персонала достигают такого уровня, что психомоторные компетенции персонала являются реакцией предприятия на влияние параметров внешней среды. Значит в условиях нормальной работы предприятия с 36 месяца по 60 месяц когнитивные и аффективные способности персонала обеспечивают адекватные затраты ресурсов на физическую работу персонала, чем с 1 месяца по 8 месяц.

Рассчитаем функционал  $\oint(v) = G$ , который характеризует внедрение метода управления через метод таксономии Блума на предприятии. С 7 периода нанимается три менеджера по персоналу в соответствии с направлениями деятельности предприятия для ведения выбранной методики управления на предприятии (динамической системе). Через 6 периодов менеджеры освобождаются от должностей. Время выполнения алгоритма через метод таксономии Блума  $\oint(v) = F(x(T)) = 417$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов в процессах (заработная плата, командировки, обуче-

ние выбранной методике управления, налоги, канцелярия, связь) на внедрение управления динамической системой по методу таксономии Б. Блума и составят 16 045 тыс. единиц ресурса. Общие затраты предприятия составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,659\,760$  тыс. единиц ресурса. Методом интегральных показателей выполнена оценка режимов работы динамической системы: первый режим  $G_{\text{обычн\_режим}}^k - 5\,069,93$  единиц и второй режим после внедрения управления таксономии Б. Блума  $G_{\text{Блум}}^k - 5\,491,18$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через таксономию Б. Блума оценивается как  $\Delta G = G_{\text{Блум}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 421,25$ . Время выполнения алгоритма с методом управления компетенции выпускников по специальностям СФУ  $\oint(v) = F(x(T)) = 412$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов на процессы (заработная плата, командировки, обучение, налоги, канцелярия, связь) на внедрение метода управления динамической системой через компетенции выпускников по специальностям СФУ и составит 34 363 тыс. единиц ресурса. Общие затраты ресурса составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,675\,805$  тыс. единиц ресурса.

Методом интегральных показателей выполнена оценка режима работы цифрового двойника предприятия как динамической системы при режиме после внедрения управления через компетенции выпускников по специальностям СФУ  $G_{\text{комп\_вып\_СФУ}}^k - 5\,491,3$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через компетенции выпускников по специальностям СФУ оценивается как  $\Delta G = G_{\text{комп\_вып\_СФУ}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 421,4$ . Время выполнения алгоритма с управлением через Национальные квалификационные рамки РФ  $\oint(v) = F(x(T)) = 430$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов на процессы (заработная плата, командировки, обучение выбранной методике управления, налоги, канцелярия, связь) на внедрение методике управления динамической системой по Национальным квалификационным рамкам РФ и составят 14 539 тыс. единиц ресурса. Общие затраты предприятия за пять лет составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,661\,226$  тыс. единиц ресурса. Методом интегральных показателей выполнена оценка режимов работы экономического объекта как динамической системы: первый режим  $G_{\text{обычн\_режим}}^k - 5\,069,93$  единиц и второй режим после внедрения Национальных квалификационных рамок  $G_{\text{НацКвалРамки}}^k - 5\,089,91$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через Национальные квалификационные рамки РФ оценивается как  $\Delta G = G_{\text{НацКвалРамки}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 19,97$ .

Обобщая расчеты (табл. 1) можно сказать, что наиболее оптимальное [59] управление достигается по функционалу  $\oint(v)$ : через  $F(x(T))$  – метод компетенций выпускников по специальности СФУ, через  $G$  – метод Национальных квалификационных рамок РФ, через  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  – метод таксономии Блума.

Таблица 1

**Оптимальное управление цифровым двойником предприятия**

Метод управления	$\oint(v)$		
	$F(x(T))$ , (мин)	$G$ , (ед.)	$v^* = (x^*(t), u^*(t))$ , (тыс. единиц ресурса)
Таксономия Блума	417	5 491,18	5 659 760
Компетенции выпускников по специальностям СФУ	412	5 491,30	5 675 805
Национальные квалификационные рамки РФ	430	5 089,91	5 661 226

**Обсуждение результатов.** Упомянутые в статье методики управления объединены в единый расчет в отдельных работах [61, 62]. При полной идентификации процессов предприятия в каждый момент времени методы управления определяющую роль не несут. На деятельность предприятия влияет точность факта и прогноза его состояния с учетом факторов внешней среды при полной идентификации процессов предприятия с любым методом управления.

Предложенный в статье алгоритм позволяет каждому департаменту или отделу предприятия использовать методики понятные только им и избежать затрат на внедрение одного метода во все департаменты или отделы предприятия без потери эффективности управления.

По значению  $G$  можно сделать вывод, что адаптация персонала предприятия к методу управления Национальные квалификационные рамки проходит легче, чем через метод компетенций выпускников по специальностям СФУ и таксономии Блума. О адаптационном напряжении более подробно можно прочитать в отдельной работе [23, 60].

Использованный в статье подход управления цифровым двойником предприятия применен для оптимального управления цифровым двойником особой экономической зоны с повышением эффективности реализации инфраструктурного проекта [63, 64], применен для оценки влияния на деятельность предприятия заражения персонала COVID-19 [63], оценки ущерба от санкций [65].

**Заключение.** Задачи, поставленные в начале статьи выполнены:

- ◆ идентифицировано предприятие как динамическая система  $S = \{T, X\}$  через представления балансовой модели В. Леонтьева в векторной форме  $X = AX + Y$ , где  $x^i(t+1) = f^i(t, x(t), u(t))$ ;

- ◆ создан цифровой двойник предприятия  $M_x$  представленный  $x$  вектором  $n$ -мерного векторного пространства  $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ ,  $x \in X$  пространства состояния системы  $X$  для которой выполнена идентификация процессов  $x_j^i$ ; с результатом их работы  $y^i$  и  $(x^i, y^i) \in M$ ,  $y^i \in Y$ ;

- ◆ создан алгоритм оптимального управления цифровым двойником предприятия через функционал  $\oint$  в паре точек  $v = (x, y)$  по процессам, т.е. заданы  $v \in M$  и сопоставлены в соответствие действительным числам  $\oint_v$  – площадь фигуры.

Расчет выполнялся по оптимальному управлению  $u(t)$  цифровым двойником предприятия  $M_x$ , как динамической системой  $S = \{T, X\}$  методиками  $V$  (Таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ, Национальные квалификационные рамки РФ) по параметрам:  $n=1,2$  млн. значений,  $T=5$  лет, шагом наблюдения и управления  $t=1$  мес.,  $X(0)=0$  при  $t=0$ ,  $Y(T)=5\ 641\ 442$  единиц ресурса.

Оптимальное управление достигается по функционалу  $\oint(v)$  в:

- ◆  $F(x(T))=412$  минут при использовании метода компетенции выпускников по специальности СФУ;
- ◆  $G=5\ 089,91$  ед. ресурса при использовании метода Национальных квалификационных рамок РФ;
- ◆  $v^* = (x^*(t), u^*(t))=5\ 659\ 760$  тыс. ед. ресурса при использовании метода таксономия Блума.

Следовательно, цель статьи выполнить оптимальное управление предприятием через его цифровой двойник, достигнута.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винер Н. Кибернетика. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1968. – 258 с.
2. Красовский А.А. Исторический очерк развития и состояния теории управления // Современная прикладная теория управления. Ч. I. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
4. Ressler O.E. Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System // Naturforsch. – 1976. – Vol. 31. – P. 1168-1172.
5. Tyukin I. Adaptation in Dynamical Systems. – UK, Cambridge University Press, 2011. – 410 p.
6. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atoms. Sci. – 1963. – Vol. 20, No. 2. – P. 130-141.
7. Биркгоф Дж. Динамические системы. – М.: ОГИЗ, 1999. – 480 с. – ISBN 5-7029-0356-0.
8. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. – 2002. – 560 с. – ISBN 5-93972-200-8.
9. Палис Ж., ду Мелу В. Геометрическая теория динамических систем: Введение. – М.: Мир, 1986. – 301 с.
10. Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability // Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 85, No. 1. – P. 87-96.
11. Haddad W.M., L'Afflitto A. Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control // Journal of the Franklin Institute. – 2015. – Vol. 352, No. 6. – P. 2329-2357.
12. Jammazi C., Abichou A. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control // Journal of Mathematical Control and Information. – 2018. – Vol. 35, No. 1. – P. 249-277.
13. Jenkins M., et al. Export Processing Zones in Latin America. Harvard Institute for International Development, Development Discussion Paper. – 1998. – No. 646 (August).
14. Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S. A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing // International Journal of Production Research. – 2016. – Vol. 54 (23). – P. 7060-7073.
15. L'Afflitto A. Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control // International Journal of Control. – 2017. – Vol. 90, No. 9. – P. 1861-1878.
16. Leontief W.W. "The Structure of American Economy," 1919-1939. Cambridge, Harvard University Press, 1941.
17. Кротов В.Ф. Основы оптимального управления. – М.: Высшая школа, 1990. – 430 с.

18. Клейнер Г.Б. Производственные функции: Теория, методы, применение. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
19. Канторович Л.В. Математико-экономические работы. – Новосибирск: Наука, 2011. – 760 с.
20. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth // Quarterly Journal of Economics. – 1956. – No. 70. – P. 65-94.
21. Schminke A., J. Van Biesebroeck. Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China, Review of World Economics (Weltwirtschaftliches Archiv). – Springer; Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013. – Vol. 149 (2). – P. 343-367.
22. Масаев С.Н. Модель межотраслевого баланса Леонтьева как задача управления динамической системой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – № 2 (135). – С. 66-82. – Doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-66-82>.
23. Масаев С.Н. Методика комплексной оценки управленческих решений в производственных системах с применением корреляционной адаптометрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: защищена 25.03.11: утв. 25.11.11. – Красноярск: СФУ, 2011. – 214 с.
24. Патент № 2741138 С1 Российская Федерация, МПК G05B 19/00, G06F 17/10. Способ идентификации объекта как системы: № 2019143313: заявл. 23.12.2019: опубл. 22.01.2021 / С. Н. Масаев.
25. Mасаev S. Depth of Planning the State of a Dynamic Discrete System by Autocorrelation Function // Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. – Sochi, 2020. – P. 989-993. – Doi 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
26. Масаев С.Н. Алгоритм оценки состояния системы (санкции, HR, TQM, PMBOK, COVID-19, пожарная безопасность) методом интегральных показателей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 1. – С. 36-48. – Doi: 10.24143/2072-9502-2021-1-36-48.
27. Doran G.T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives // Management Review. СФУ 1981. СФУ Vol. 70. СФУ Is. 11 (AMA Forum). СФУ P. 35, 36.
28. Chandler A.D. Strategy and Structure: A Chapter in the History of Industrial Enterprises. Cambridge, Mass, MIT Press, 1962. – 463 p.
29. BS 7799-3:2006 "Information security management systems – Part 3: Guidelines for information security risk management".
30. Forsberg K. and Mooz H. The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle // The 12th INTERNET World Congress on Project Management, Center for Systems Management Oslo, Norway, 1994. – 12 p.
31. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
32. VZPM Verein zur Zertifizierung von Projektmanagern der SPM Gesellschaft für Projektmanagement and der SGO Gesellschaft für Organisation: Beurteilungsstruktur, Begleitmaterial zur Zertifizierung von Projektmanagern, Switzerland, Ausgabe 1996, Version 1.00 vom 30.11.1996.
33. Ebel N. PRINCE 2:2009 TM – für Projekt management mit Methode. Munchen, Addison-Wesley Verlag, 2011. – 568 p.
34. DIN 69901-1 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme Teil1: Grundlagen. Berlin: Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, 2009. – 30 p.
35. ISO Guide 73:2002. Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards.
36. ISO/IEC 13335-1:2004. Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management.
37. ГОСТ 1.2–2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены».
38. Сейфи Т.Ф. Слагаемые высокого качества. – Горький: Волго-Вятское изд-во, 1960.
39. Сейфи Т.Ф., Бакаев В.И., Скворцов Т.П. Производственные основы надежности. – М.: Изд-во стандартов, 1966.

40. CAN/CSA-ISO 10006-98 Quality management - Guidelines to quality in project management. National Standard of Canada. – URL: <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/7041>.
41. Australian Institute for Project Management. National Competence Standard for Project Management – Guidelines. Australian Institute for Project Management. 1996. Australia.
42. *Chung K., Lee H.C., Jung K.H.* Korean Management: Global Strategy and Cultural Transformation. – Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1997.
43. Guidebook of Project & Program Management for Enterprise Innovation (P2M). – 2005. – URL: <http://www.pmaj.or.jp/ENG/>.
44. *Адизес И.* Управление жизненным циклом корпорации = Managing Corporate Lifecycles. – СПб.: Питер, 2007. – 384 с. – (Теория менеджмента). – ISBN 978-5-469-01523-9.
45. *Webb J.F.* Space Age Management. – NY.: McGraw-Hill Book Company, 1969.
46. Квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других служащих утвержден постановлением Минтруда России от 21 августа 1998 г. № 37.
47. Приказ Министерства образования и науки РФ от 12 сентября 2013 г. N 1061 "Об утверждении перечней специальностей и направлений подготовки высшего образования" (с изменениями и дополнениями).
48. Совет Европы: Симпозиум по теме «Ключевые компетенции для Европы»: Док. DECS / SC / Sec. (96) 43. – Берн, 1996.
49. Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. A report from a Joint Quality Initiative informal group (contributors to the document are provided in the Annex). 18 October 2004. – Режим доступа: [http://www.nvaio.net/page/downloads/Dublin\\_Descriptors.pdf](http://www.nvaio.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf).
50. Kommunique von Maastricht zu den zukünftigen Prioritäten der europäischen Zusammenarbeit in der Berufsbildung, Maastricht 14. Dezember 2004.
51. Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR), Luxemburg 2008. – Режим доступа: [http://ec.europa.eu/dgs/education\\_culture/publ/pdf/eqf/broch\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf).
52. Макет: Рамки профессиональных квалификаций в области управления персоналом. Национальный совет при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям. – Режим доступа: <http://sovethr.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%9E%D0%A0%D0%9A-HR-v1.pdf>.
53. *Backlund F., Choronner D., Sundqvist E.* Project Management Maturity Models. A Critical Review. A case study within Swedish engineering and construction organizations // 27th IPMA World Congress. – 2014. – No. 119. – P. 837-846.
54. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th Edition, Project Management Institute (PMI), USA, 2012.
55. A guidebook of Projekt&Program Management For Enterprise Innovation. PMCC/ENNA, Japan, 2002.
56. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
57. *Bloom, B.S. and Krathwohl D.R.* Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals, by a committee of college and university examiners. Handbook I: Cognitive Domain. NY, NY: Longmans, Green, 1956.
58. *Anderson J.W., Krathwohl D.R., Airasia P.W.* A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of education. – New York, 2003. – 336 p.
59. *Bellman R.* Dynamic programming, Princeton University Press, New Jersey, 1957.
60. *Gorban A.N., Tyukina T.A., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I.* Evolution of adaptation mechanisms: adaptationenergy, stress, and oscillating death // J. of Theoretical Biology. – 2016. – P. 127-139.
61. *Масаев С.Н.* Концепция построения структуры управления динамической системой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 40-46. – Doi 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46.
62. *Масаев С.Н.* Идентификация объекта как системы на основе интегральных показателей // Информатизация и связь. – 2020. – № 6. – С. 65-67.
63. *Masaev S.N.* Assessment various control methods a digital copy of enterprise by integral indicator // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 32011. – Doi: 10.1088/1742-6596/1679/3/032011.

64. *Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V.* Acceptable area of optimal control for a multidimensional system // *Journal of Physics: Conference Series*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 22091. – Doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.
65. *Masaev S.N.* 2019 Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD) (Moscow: Russia, IEEE). – P. 1-5. – Doi: 10.1109/MLSD.2019.8910997.

REFERENCES

1. *Viner N.* *Kibernetika [Cybernetics]*. 2nd ed. Moscow: Sov. radio, 1968, 258 p.
2. *Krasovskiy A.A.* *Istoricheskiy ocherk razvitiya i sostoyaniya teorii upravleniya [Historical outline of the development and state of control theory]*, *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya [Modern Applied Control Theory]*. Part I. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 400 p.
3. *Tsyupkin Ya.Z.* *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh [Adaptation and training in automatic systems]*. Moscow: Nauka, 1968, 400 p.
4. *Ressler O.E.* *Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System*, *Naturforsch*, 1976, Vol. 31, pp. 1168-1172.
5. *Tyukin I.* *Adaptation in Dynamical Systems*. UK, Cambridge University Press, 2011, 410 p.
6. *Lorenz E.N.* *Deterministic Nonperiodic Flow*, *J. Atoms. Sci.*, 1963, Vol. 20, No. 2, pp. 130-141.
7. *Birkhof Dzh.* *Dinamicheskie sistemy [Dynamic systems]*. Moscow: OGIZ, 1999, 480 p. ISBN 5-7029-0356-0.
8. *Gukenkheymer Dzh., Kholms F.* *Nelineynye kolebaniya, dinamicheskie sistemy i bifurkatsii vektornykh poley [Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields]*, 2002, 560 p. ISBN 5-93972-200-8.
9. *Palis Zh., di Melu V.* *Geometricheskaya teoriya dinamicheskikh sistem: Vvedenie [Geometric theory of dynamical systems: Introduction]*. Moscow: Mir, 1986, 301 p.
10. *Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J.* *Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability*, *Nonlinear Dynamics*, 2016, Vol. 85, No. 1, pp. 87-96.
11. *Haddad W.M., L'Afflitto A.* *Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control*, *Journal of the Franklin Institute*, 2015, Vol. 352, No. 6, pp. 2329-2357.
12. *Jammazi C., Abichou A.* *Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control*, *Journal of Mathematical Control and Information*, 2018, Vol. 35, No. 1, pp. 249-277.
13. *Jenkins M., et al.* *Export Processing Zones in Latin America*. Harvard Institute for International Development, Development Discussion Paper, 1998, No. 646 (August).
14. *Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S.* *A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing*, *International Journal of Production Research*, 2016, Vol. 54 (23), pp. 7060-7073.
15. *L'Afflitto A.* *Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control*, *International Journal of Control*, 2017, Vol. 90, No. 9, pp. 1861-1878.
16. *Leontief W.W.* "The Structure of American Economy," 1919-1939. Cambridge, Harvard University Press, 1941.
17. *Krotov V.F.* *Osnovy optimal'nogo upravleniya [The basics of optimal management]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 430 p.
18. *Kleyner G.B.* *Proizvodstvennye funktsii: Teoriya, metody, primeneniye [Production functions: Theory, methods, application]*. Moscow: Finansy i statistika, 1986, 239 p.
19. *Kantorovich L.V.* *Matematiko-ekonomicheskie raboty [Mathematical and economic work]*. Novosibirsk: Nauka, 2011, 760 p.
20. *Solow R.* *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, *Quarterly Journal of Economics*, 1956, No. 70, pp. 65-94.
21. *Schminke A., J. Van Biesebroeck.* *Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China*, *Review of World Economics (Weltwirtschaftliches Archiv)*. Springer; Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013, Vol. 149 (2), pp. 343-367.

22. *Masaev S.N.* Model' mezhotraslevogo balansa Leont'eva kak zadacha upravleniya dinami-cheskoy sistemoy [Leontev input-output balance model as a dynamic system control problem], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2021, No. 2 (135), pp. 66-82. Doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-66-82>.
23. *Masaev S.N.* Metodika kompleksnoy otsenki upravlencheskikh resheniy v proizvodstvennykh sistemakh s primeneniem korrelyatsionnoy adaptometrii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Methodology for the integrated assessment of managerial decisions in production systems using correlation adaptometry: cand. of eng. sc. diss]: 05.13.06: protected 25.03.11: approved 25.11.11. Krasnoyarsk: SFU, 2011, 214 p.
24. *Masaev S.N.* Sposob identifikatsii ob"ekta kak sistemy [Method of identifying object as system]. Patent RF, No. 2741138, 2021.
25. *Masaev S.* Depth of Planning the State of a Dynamic Discrete System by Autocorrelation Function, *Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*. Sochi, 2020, pp. 989-993. Doi 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
26. *Masaev S.N.* Algoritm otsenki sostoyaniya sistemy (sanktsii, HR, TQM, PMBOK, COVID-19, pozharnaya bezopasnost') metodom integral'nykh pokazateley [Algorithm for assessing the state of the system (sanctions, HR, TQM, PMBOK, Covid-19, fire safety) by the method of integrated indicators], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2021, No. 1, pp. 36-48. Doi 10.24143/2072-9502-2021-1-36-48.
27. *Doran G.T.* There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives, *Management Review*. СФУ 1981. СФУ Vol. 70. СФУ Is. 11 (AMA Forum). СФУ P. 35, 36.
28. *Chandler A.D.* Strategy and Structure: A Chapter in the History of Industrial Enterprises. Cambridge, Mass, MIT Press, 1962, 463 p.
29. BS 7799-3:2006 "Information security management systems – Part 3: Guidelines for information security risk management".
30. *Forsberg K. and Mooz H.* The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle, *The 12th INTERNET World Congress on Project Management, Center for Systems Management Oslo, Norway, 1994*, 12 p.
31. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
32. VZPM Verein zur Zertifizierung von Projektmanagern der SPM Gesellschaft fur Projektmanagement and der SGO Gesellschaft fur Organisation: Beurteilungsstruktur, Begleitmaterial zur Zertifizierung von Projektmanagern, Switzerland, Ausgabe 1996, Version 1.00 vom 30.11.1996.
33. *Ebel N.* PRINCE 2:2009 TM – fur Projekt management mit Methode. Munchen, Addison-Wesley Verlag, 2011, 568 p.
34. DIN 69901-1 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme Teil1: Grundlagen. Berlin: Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, 2009, 30 p.
35. ISO Guide 73:2002. Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards.
36. ISO/IEC 13335-1:2004. Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management.
37. GOST 1.2–2015 «Mezhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhgosudarstvennyye, pravila i rekomendatsii po mezhgosudarstvennoy standartizatsii. Pravila razrabotki, prinyatiya, obnovleniya i otmeny» [GOST 1.2–2015 «Mezhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhgosudarstvennyye, pravila i rekomendatsii po mezhgosudarstvennoj standartizatsii. Pravila razrabotki, prinyatiya, obnovleniya i otmeny»].
38. *Seyfi T.F.* Slagaemye vysokogo kachestva [High quality components]. Gor'kiy: Volgo-Vyatskoe izd-vo, 1960.
39. *Seyfi T.F., Bakaev V.I., Skvortsov T.P.* Proizvodstvennyye osnovy nadezhnosti [Manufacturing fundamentals of reliability]. Moscow: Izd-vo standartov, 1966.
40. CAN/CSA-ISO 10006-98 Quality management - Guidelines to quality in project management. National Standard of Canada. Available at: <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/7041>.

41. Australian Institute for Project Management. National Competence Standard for Project Management – Guidelines. Australian Institute for Project Management. 1996. Australia.
42. *Chung K., Lee H.C., Jung K.H.* Korean Management: Global Strategy and Cultural Transformation. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1997.
43. Guidebook of Project & Program Management for Enterprise Innovation (P2M), 2005. Available at: <http://www.pmaj.or.jp/ENG/>.
44. *Adizes I.* Upravlenie zhiznennym tsiklom korporatsii = Managing Corporate Lifecycles [Managing Corporate Lifecycles]. Saint Petersburg: Piter, 2007, 384 p. (Teoriya menedzhmenta). ISBN 978-5-469-01523-9.
45. *Webb J.F.* Space Age Management. NY.: McGraw-Hill Book Company, 1969.
46. Kvalifikatsionnyy spravochnik dolzhnostey rukovoditeley, spetsialistov i drugikh sluzhashchikh utverzhen postanovleniem Mintruda Rossii ot 21 avgusta 1998 g. № 37 [The qualification reference book of the positions of managers, specialists and other employees was approved by the decree of the Ministry of Labor of Russia dated August 21, 1998 No. 37].
47. Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 12 sentyabrya 2013 g. N 1061 "Ob utverzhenii perechnykh spetsial'nostey i napravleniy podgotovki vysshego obrazovaniya" (s izmeneniyami i dopolneniyami) [Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of September 12, 2013 N 1061 "On approval of the lists of specialties and areas of training for higher education" (with amendments and additions)].
48. Sovet Evropy: Simpozium po teme «Klyuchevye kompetentsii dlya Evropy» [Council of Europe: Symposium on Key Competencies for Europe]: Dok. DECS / SC / Sec. (96) 43. Bern, 1996.
49. Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. A report from a Joint Quality Initiative informal group (contributors to the document are provided in the Annex). 18 October 2004. Available at: [http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin\\_Descriptors.pdf](http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf).
50. Kommunique von Maastricht zu den zukünftigen Prioritäten der verstärkten europäischen Zusammenarbeit in der Berufsbildung, Maastricht 14. Dezember 2004.
51. Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR), Luxemburg 2008. Available at: [http://ec.europa.eu/dgs/education\\_culture/publ/pdf/eqf/broch\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf).
52. Maket: Ramki professional'nykh kvalifikatsiy v oblasti upravleniya personalom. Natsional'nyy sovet pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po professional'nym kvalifikatsiyam [Layout: Framework for professional qualifications in personnel management. National Council for Professional Qualifications under the President of the Russian Federation]. Available at: <http://sovethr.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%9E%D0%A0%D0%9A-HR-v1.pdf>.
53. *Backlund F., Choronner D., Sundqvist E.* Project Management Maturity Models. A Critical Review. A case study within Swedish engineering and construction organizations, *27th IPMA World Congress*, 2014, No. 119, pp. 837-846.
54. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th Edition, Project Management Institute (PMI), USA, 2012.
55. A guidebook of Projekt&Program Management For Enterprise Innovation. PMCC/ENNA, Japan, 2002.
56. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
57. *Bloom, B.S. and Krathwohl D.R.* Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals, by a committee of college and university examiners. Handbook I: Cognitive Domain. NY, NY: Longmans, Green, 1956.
58. *Anderson J.W., Krathwohl D.R., Airasia P.W.* A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of education. New York, 2003, 336 p.
59. *Bellman R.* Dynamic programming, Princeton University Press, New Jersey, 1957.
60. *Gorban A.N., Tyukina T.A., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I.* Evolution of adaptation mechanisms: adaptation energy, stress, and oscillating death, *J. of Theoretical Biology*, 2016, pp. 127-139.
61. *Masaev S.N.* Kontseptsiya postroeniya struktury upravleniya dinamicheskoy sistemoy [The concept of creating a dynamic system control structure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2021, Vol. 64, No. 1, pp. 40-46. Doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46.
62. *Masaev S.N.* Identifikatsiya ob"ekta kak sistemy na osnove integral'nykh pokazateley [Identification of an object as a system based on integral indicators], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2020, No. 6, pp. 65-67.

63. *Masaev S.N.* Assessment various control methods a digital copy of enterprise by integral indicator, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 32011. Doi 10.1088/1742-6596/1679/3/032011.
64. *Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V.* Acceptable area of optimal control for a multidimensional system, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 22091. Doi 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.
65. *Masaev S.N.* 2019 Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD) (Moscow: Russia, IEEE), pp. 1-5. Doi: 10.1109/MLSD.2019.8910997.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.В. Ковалев.

**Масаев Сергей Николаевич** – Сибирский федеральный университет; e-mail: faberi@list.ru; г. Красноярск, Россия; к.т.н.; доцент.

**Masaev Sergei Nikolaevich** – Siberian Federal University; e-mail: faberi@list.ru; Krasnoyarsk, Russia; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-32-42

**С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов**

#### **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РАМКАХ КВАНТОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

*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 статья посвящена решению задачи исследования и разработки методов оптимизации квантовых вычислений в рамках применения квантовых ускорителей. Предложена структурная схема аппаратного ускорителя для увеличения производительности моделируемых квантовых вычислений. Была проведена разработка структурной схемы модуля связи аппаратного ускорителя и программной модели. 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, а компьютерная симуляция квантовых физических явлений и особенностей слабо освещена в мире.*

*Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор; сложность алгоритма.*

**S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov**

#### **DEVELOPMENT OF METHODS OF OPTIMIZATION AND PARALLELIZATION OF COMPUTATIONAL PROCESSES IN QUANTUM ACCELERATORS**

*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 others. tasks in real- and accelerated-time scale. This article is devoted to solving the problem of research and development of methods for optimizing quantum computing within the framework of the application of quantum accelerators. A block diagram of a hardware accelerator is proposed to increase the performance of simulated quantum computing. The development of the structural diagram of the communication module of the hardware accelerator and the software model was carried out. 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, and the computer simulation of quantum physical phenomena and features is poorly covered in the world.

*Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator; complexity of the algorithm.*

**Введение.** История компьютерной архитектуры насчитывает несколько десятилетий и постоянно развивается. Важным расширением является появление ускорителей [1] как специализированных процессоров, где главный процессор разгружает подходящие вычислительные задачи. В последнее время исследования компьютерной архитектуры все больше сосредотачиваются на квантовых вычислениях [2]. Квантовый ускоритель основан на идее, что любое конечное приложение содержит несколько вычислительных ядер, и свойства этих частей лучше выполняются с помощью конкретного ускорителя, который может быть либо программируемыми вентилями матрицами [3] (FPGA), либо графическими процессорами [4] (GPU), нейронными процессорами [5] (NPU), такими как тензорный процессор [6] Google (TPU) и т.д.

**1. Разработка алгоритма оптимизации.** Без оптимизации мы вынуждены производить одно воздействие на квантовый регистра за время  $O(2^{4n} + 2^{3n})$  и использовать  $O(2^{2n} + 2^n)$  ячеек памяти,  $n$  – количество кубит. С оптимизацией количество операций является равным  $O(2^{n-1})$ , а объем памяти составляет  $O(2^n)$ . Данный алгоритм хотя и входит в класс NP – сложных алгоритмов, однако его использование предпочтительно.

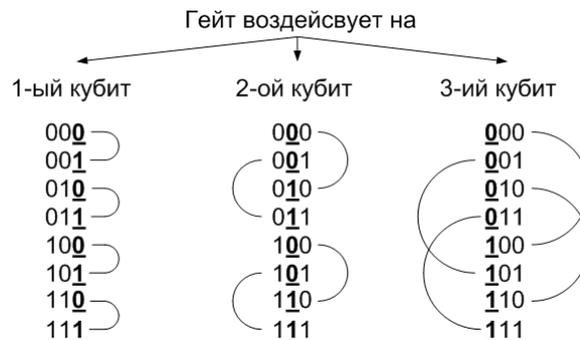


Рис. 1. Последовательность выбора состояний в зависимости от кубита

Как видно данный алгоритм можно распараллелить по принципу SIMD (Single Instruction Multiple Data). Двухкубитовые и трехкубитовые квантовые вентили, как правило, меняют состояния в модели квантового регистра. Для применения данных гейтов также будем использовать алгоритм, который не создает матрицу преобразования, а делает выборку состояний из квантового регистра и меняет их местами. Рассмотрим в качестве примера вентиль CNOT. Исходя из вышеперече-

численных утверждений, можно представить следующий алгоритм для увеличения производительности модели квантового компьютера для многокубитовых операций в виде блок-схемы, показанной на рис. 3. В начале алгоритма воздействия многокубитового вентиля с оптимизацией, представленного на рис. 3, производится инициализация модели квантового регистра, что представляет собой установку амплитуды со значением 1 для одного из состояний регистра. Далее происходит вычисление бинарного индекса кубита (`qubit_binary_index`), который представляет число с установленной единицей в разряде, соответствующем номеру кубита, на который производится воздействие. Затем в цикле происходит обход состояний модели квантового регистра и выборка пары состояний для осуществления воздействия вентиля. Для правильной выборки используется переменная маска (`qubit_mask`), которая при помощи операции конъюнкции фильтрует значения (индексы состояний) таким образом, чтобы соблюдалась последовательность выборки пар состояний. После обхода всех состояний алгоритм завершается. Далее рассмотрим случай применения контролируемого двухкубитового квантового вентиля. Так же, как и в случае с однокубитовыми квантовыми вентилями, размер модели квантового регистра не влияет на результативность алгоритма. Для того чтобы описать всевозможные комбинации контролируемых двухкубитовых вентилях, воспользуемся определением контролируемого  $U$ , где  $U$  – это матрица  $2 \times 2$ , соответствующая модели обратимого однокубитового преобразования. Пример выборки (рис. 2) состояний представлен следующим образом:

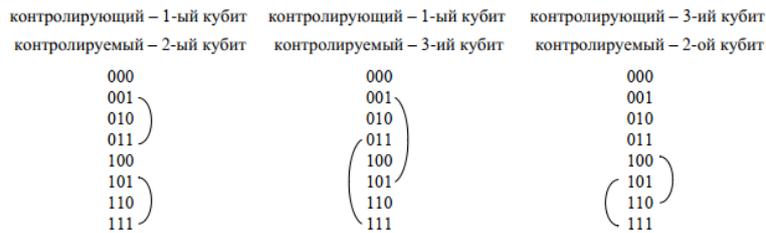


Рис. 2. Пример выборки состояний для двухкубитового универсального контролируемого вентиля

Двухкубитовые и трехкубитовые квантовые вентили, как правило, меняют состояния в модели квантового регистра. Для применения данных гейтов [21] так же будем использовать алгоритм, который не создает матрицу преобразования, а делает выборку состояний из квантового регистра и меняет их местами. Рассмотрим в качестве примера вентиль CNOT. Исходя из вышеперечисленных утверждений, можно представить следующий алгоритм для увеличения производительности модели квантового компьютера для двухкубитовых операций [22] в виде блок-схемы, показанной на рис. 3. Зависимость при выборке пар состояний для двухкубитового контролируемого вентиля может быть отражена с небольшим изменением представленного выше алгоритма.

Как видно из блок-схемы на рис. 3, в случае двухкубитового контролируемого квантового вентиля имеем две переменные, хранящие бинарные индексы контролирующего и контролируемого кубитов. При обходе состояний квантового регистра так же, как и случае с однокубитовыми квантовыми вентилями, выбираются пары состояний. За правильность выборки отвечают две переменные, которые устанавливаются при помощи операции конъюнкции между текущим индексом состояния и бинарным индексом одного из кубитов, участвующих в преобразовании. Также можно проследить отличие алгоритма воздействия двухкубитового вентиля в количестве переменных масок.

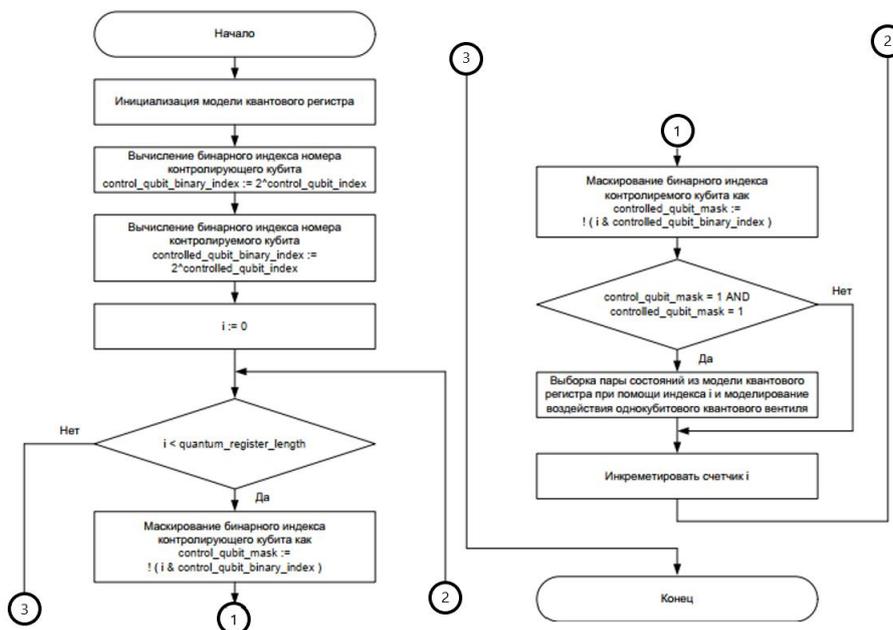


Рис. 3. Блок-схема алгоритма воздействия двухкубитового контролирующего вентиля, используя оптимизацию

Остальные части алгоритма, которые осуществляют непосредственную выборку по сформированным индексам состояний из модели квантового регистра и осуществление преобразования, остаются неизменными.

**2. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений.** Общая схема аппаратного ускорителя изображена на рис. 4. Блоки «Устройство управления» (УУ) и «Память микропрограммы» (ПМ) являются стандартными при реализации ускорителей. Главными функциями УУ являются осуществление инициализации данных, организация выборки и исполнение команды из ПМ. Также УУ необходимо получать данные извне и правильно их обрабатывать. Однако поскольку существует большое количество интерфейсов, то схема контроллера интерфейса здесь не рассматривается и будем условно предполагать, что данные поступают с шины X, данные на которой формируются контроллером интерфейса ускорителя. Далее следуют блоки специфичные для ускорителя квантовых вычислений, а именно «Блок генерации пар индексов состояний» (БГИС) и «Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ» (БУАиВС). «Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ» (БУАиВС).



Рис. 4. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений

БГИС реализует алгоритм, который ищет последовательность состояний, в зависимости от операции (однокубитовая или многокубитовая) и кубита(ов) на который будет применяться данное воздействие. Сигналы выборки с БГИС поступают на вход БУАиВС, который определяет как наиболее эффективно извлечь данные из «блока ОЗУ» (БО), так как ОЗУ может быть несколько для увеличения производительности и организации параллелизма вычислений.

Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ (УАЛУиВС) является связующим блоком между ОЗУ и блоком параллельных АЛУ. Его графическое изображение представлено на рис. 5.

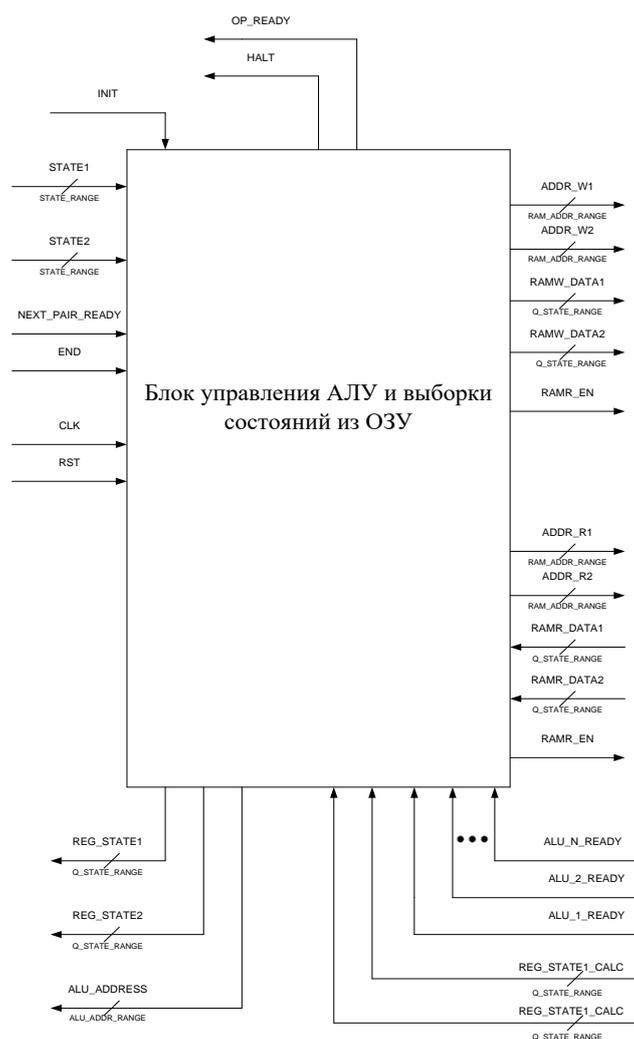


Рис. 5. Графическое представление блока управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ

На вход данного блока поступают сигналы с блока выборки состояний «STATE1» и «STATE2» - пара указателей на состояния в ОЗУ. По данным состояниям блок выборки состояний из ОЗУ формирует адреса, по которым хранятся состояния модели квантового регистра, представленном двухпортовым ОЗУ.

Так как блок параллельных АЛУ функционирует независимо от блока выборки состояний, то необходимо предусмотреть вариант, когда все АЛУ будут заняты вычислениями. Для такой ситуации устанавливается флаг «HALT» для приостановки генерации пар состояний.

Инициализация памяти микропрограммы осуществляется, когда по шине интерфейса начинает поступать информация в виде микрокоманд. После инициализации ПМ блок УУ ожидает сигнала на запуск выполнения микропрограммы. УУ считывает и дешифрирует микрокоманду и в зависимости от типа микрокоманды может генерировать следующие сигналы:

- ◆ сигналы инициализации ОЗУ, хранящее вектор состояний (модель квантового регистра);
- ◆ сигналы, необходимые для вычислений квантового вентиля (вентили могут быть однокубитовыми, двухкубитовыми и трехкубитовыми);
- ◆ сигналы конца вычислений, которые сопровождаются сигналами, инициализирующими считывание вектора состояний, хранящимися в блоке параллельных ОЗУ.

Формат микрокоманды такого ускорителя может быть представлен следующим образом:



Рис. 6. Формат микрокоманды ускорителя

Так как методика аппаратного ускорителя приводится для переменного количества кубитов и вентилях (то есть количество кубитов и операций может быть разным для ускорителей такого типа), дается только формат представления микрокоманды без фиксированного значения полей. Однако поле «Код операции» фиксированной величины 2 бита может содержать следующие значения:

- ◆ «00» – код операции «старт вычислений»; по данной операции происходит инициализации остальных блоков ускорителя;
- ◆ «01» – код операции «квантовый вентиль»; по данной операции происходит дешифрация остальных полей микрокоманды и генерация сигналов, поступающих на блок расчета выборки состояний из ОЗУ.
- ◆ «11» – код операции «конец вычислений»; по данной операции происходит генерация сигналов для выдачи информации с ОЗУ на контроллер шины интерфейса.

**3. Вычислительный эксперимент по сравнению процесса моделирования без применения алгоритма оптимизации и с применением.** Выполним сравнение процесса моделирования без применения алгоритма оптимизации и с применением такового. Возьмем задачу коммивояжера – комбинацию набора городов и расстояния между каждым двумя городами, чтобы найти тот, у которого наименьшее общее расстояние, пройденное туром, который объезжает все города только один раз и возвращается к месту отправления. Эта проблема относится к классу трудностей NP в теории вычислительной сложности. Квантовый алгоритм оптимизации может быть применим и к классическим вариациям задачи коммивояжера.

При проведении экспериментов получены результаты (рис. 7, 8), отображающие зависимость вероятности ошибки  $p$  для идентификации двухбитного оракула  $k$  от количества запросов  $N$ .

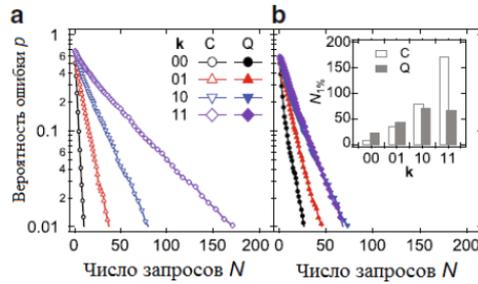


Рис. 7. Диаграмма результатов проведения экспериментов при использовании классического и квантового алгоритма

Также было установлено, что показатель вероятности ошибки  $\sim \rho$  при проведении алгоритма оптимизации усредняется по всем  $n$ -разрядным оракулам  $k$ . Если рассматривать график а, то  $n = 2$ ; если график б, то  $n = 3$ . Использование аналоговых измерений улучшает показатели работы, как классических, так и квантовых алгоритмов, в сравнении с цифровыми измерениями. Аналоговый преобразователь Q оказывается наиболее эффективным решением. Более того, разрыв между квантовым преобразователем Q и классическим преобразователем C растет с увеличением количества битов  $n$ .

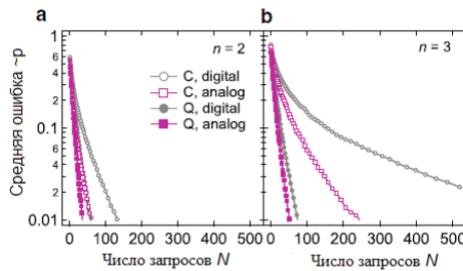


Рис. 8. Диаграмма результатов проведения экспериментов при использовании классического и квантового алгоритма

Таким образом, работа алгоритма оптимизации превосходит в ключевых показателях (например, производительность) работу алгоритмов без оптимизации. Без оптимизации мы вынуждены производить одно воздействие на квантовый регистр за время и использовать ячеек памяти,  $n$  – количество кубит. Данный алгоритм хотя и входит в класс NP-сложных алгоритмов, однако его использование предпочтительно.

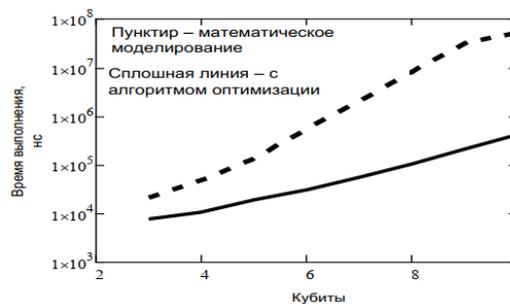


Рис. 9. Результаты моделирования

**Заключение.** В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что идея квантового компьютера была высказана еще Р. Фейнманом в 1982 г. и с тех пор проводятся научные исследования по этой тематике, квантовые компьютеры еще не созданы. Однако, уже сейчас ясно, что теоретических ограничений для этого нет. Кроме того, имеются определенные достижения в области теории квантовых вычислений.

В ходе исследования была продемонстрирована возможность ускорения моделирования квантовых вычислений при помощи распределенных вычислений. Данный подход находит своё применение на практике в написании математических ядер [25], которые направлены не только на реализацию моделирования квантовых вычислений, но и на увеличение производительности вычислений и количества моделируемых кубитов.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00916.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовая криптография // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (дата обращения: 07.03.2021).
2. Трубицын А.А. Расчет траектории движения материальной точки в двумерном (осесимметричном) консервативном поле // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 7. – P. 1113-1115.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. – Springer, 1991. – 392 p. – ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm. (2020, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2020, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum\\_phase\\_estimation\\_algorithm&oldid=731732789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789).
5. Richard G., Milner A. Short History of Spin // Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
6. Гушанский С.М., Потапов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
7. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двумерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
8. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двумерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
9. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – November 12–14 2000. – 515 p.
10. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 437-441.
11. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Attractive photons in a quantum nonlinear medium // Nature. – October 2013. – Vol. 502.
12. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computation and Quantum Information. – М.: Мир, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum\\_programming&oldid=740376291](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291).
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM\\_Q\\_Experience&oldid=8708780](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=8708780).

15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. – URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum\\_mechanics&oldid=772744105](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105).
16. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
17. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies. – Brdbk edition. – Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02. – С. 23. – 24 с. – ISBN 9781492656227.
18. Wilde M. From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потанов В.С. Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 76-86.
20. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer Verlag, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.
21. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с. – ISBN 0-07-013151-1.
22. Оптимизация // Википедия [2018–2018]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (дата обращения: 10.08.2018).
23. 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. 26-37.
24. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
25. Потанов 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 ИТСАНУ-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.

## REFERENCES

1. Kvantovaya kriptografiya [Quantum cryptography], *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (accessed 07 March 2021).
2. Trubitsyn A.A. Raschet traektorii dvizheniya material'noy tochki v dvumernom (osesimmetrichnom) konservativnom pole [Calculation of the trajectory of a material point in a two-dimensional (axisymmetric) conservative field], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1990, Vol. 30, No. 7, pp. 1113-1115.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. Springer, 1991, 392 p. ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm. (2020, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2020, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum\\_phase\\_estimation\\_algorithm&oldid=731732789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789).
5. Richard G., Milner A. Short History of Spin, *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
6. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methods of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
7. 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 modeling 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. 3, pp. 223-233.
8. 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 modeling 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. 3, pp. 223-233.

9. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. November 12–14 2000, 515 p.
10. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes, *2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 437-441.
11. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Attractive photons in a quantum nonlinear medium, *Nature*, October 2013, Vol. 502.
12. Nil'sen M., Chang I. Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya = Quantum Computation and Quantum Information [Quantum computing and quantum Information = Quantum Computing and Quantum Information]. Moscow: Mir, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum\\_programming&oldid=740376291](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291).
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM\\_Q\\_Experience&oldid=8708780](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=8708780).
15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum\\_mechanics&oldid=772744105](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105).
16. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
17. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies. Brdbk edition. Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02, pp. 23, 24 p. ISBN 9781492656227.
18. Wilde M. From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Kolichestvennye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2016, No. 3, pp. 76-86.
20. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.
21. Tomas Kh. Kormen, Charl'z I. Leyzerson, Ronal'd L. Rivest, Klifford Shtayn. Algoritmy: postroenie i analiz = Introduction to Algorithms [Algorithms: construction and analysis = Introduction to Algorithms]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2006, 1296 p. ISBN 0-07-013151-1.
22. Optimizatsiya [Optimization], *Vikipediya [2018–2018]*, [Wikipedia [2018-2018]]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (accessed 10 August 2018).
23. 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. 26-37.
24. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
25. 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.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент М.Ю. Поленов.

**Гушанский Сергей Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

**Потапов Виктор Сергеевич** – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; ассистент.

**Божич Владимир Иванович** – ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)», Таганрогский институт им. А.П. Чехова; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634367866; кафедра естественных и безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; профессор.

**Gushanskiy Sergey Mikhailovich** – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Potapov Victor Sergeevich** – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; the department of computer engineering; assistant.

**Bozhich Vladimir Ivanovich** – FSBEI HE “RSEU (RINH)”, Taganrog Institute A.P. Chekhov, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634367866; the department of natural sciences and life safety; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 517.656.02

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-42-54

**Е.В. Пиневич, Д.С. Алтынов, В.С. Лисовский****ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР И СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

*Реализована задача, максимизации технико-экономической эффективности и ее применение в целях своевременного и полного выполнения задач по обеспечению устойчивого и безопасного функционирования транспортного комплекса. Целью является нахождение минимального необходимого для перевозок числа человеко-ресурсов. Руководствуясь основными положениями бережливого производства, была реализована задача оптимизации количества трудовых ресурсов. Построена математическая оптимизационная модель штатного расписания для распределения задач штатно-ресурсным единицам для управления перевозочными процессами. Оптимизационная задача решалась с использованием класса интервальных графов с максимальной нагрузкой на один цвет. Для реализации поставленной задачи было создано программное средство, позволяющее использовать для внедрения на производстве, производя расчеты нахождения оптимального количества трудовых ресурсов при заданных граничных условиях, с полной загрузкой системы при максимальной нагрузке определенных цветов в классе графов интервалов. Представленные результаты могут быть использованы как непосредственно самими субъектами транспортной инфраструктуры, так и в системах управления предприятий и организаций, осуществляющих свою деятельность в области обеспечения транспортной безопасности, в агрегаторах грузоперевозок и логистических отделах различных компаний. Возможно построение различных оптимальных вариантов организационных структур и подразделений транспортной безопасности с минимальными затратами на организацию процессов перевозок.*

*Транспортная безопасность; графы; железнодорожный транспорт; перевозки; транспорт; оптимизация; интервалы; усиление цвета; операции; производительность; бережливое производство; организационные структуры; ресурсы.*

**E.V. Pinevich, D.S. Altynov, V.S. Lisovsky****OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES AND COMPOSITION OF TRANSPORT SECURITY UNITS IN RAILWAY TRANSPORT**

*The article implements the task of maximizing the technical and economic efficiency and its application for the timely and complete implementation of tasks to ensure the sustainable and safe functioning of the transport unit. The goal is to find the minimum number of human resources required for transportation. Guided by the main provisions of lean production, the task of optimiz-*

*ing the number of labor resources was implemented. A mathematical optimization model of the staffing table for the distribution of tasks to staff-resource units for the management of transportation processes is constructed. The optimization problem was solved using a class of interval graphs with a maximum load per color. To implement this task, a software tool was created that allows it to be used for implementation in production, making calculations for finding the optimal amount of labor resources under given boundary conditions, with full system load at maximum load of certain colors in the class of interval graphs. The presented results can be used both directly by the subjects of transport infrastructure, and in the management systems of enterprises and organizations that carry out their activities in the field of transport security, in freight aggregators and logistics departments of various companies. It is possible to build various optimal variants of organizational structures and departments of transport security with minimal costs for the organization of transportation processes.*

*Transport safety; graphs; railway transport; transportation; transport; optimization; intervals; color enhancement; operations; productivity; lean manufacturing; organizational structures; resources.*

**1. Введение.** В последнее время одним из наиболее востребованных и актуальных инструментов повышения качества работы стала логистика и наиболее нуждающейся отраслью в ней – транспорт.

Цифровизация транспортных потоков в течение последнего десятилетия дала новые возможности развития железнодорожного транспорта, как пассажирского, так и грузового. Рынок реформируется в пользу конечного потребителя и также актуальной остается проблема обеспечения безопасности транспортных перевозок при рациональном использовании ресурсов.

Необходимость оптимизации организационной структуры и состава подразделений транспортной безопасности (далее ПТБ) вызвана множеством факторов: изменениями объемов и структуры возлагаемых на них задач, появлением новых видов угроз и технических средств, при помощи которых эти угрозы могут быть реализованы, нестабильностью ресурсно-экономического обеспечения реализации мер по обеспечению транспортной безопасности, снижением уровня квалификации аттестованных работников ПТБ, постоянным изменением нормативно-правовой базы обеспечения транспортной безопасности, повышением требований к безопасности функционирования железнодорожного транспорта, оптимальному использованию ресурсов [1–6].

Естественным способом корректировки состава и организационной структуры подразделений транспортной безопасности (далее – ОСПТБ) к меняющимся условиям выполнения задач, а также ресурсно-экономического обеспечения транспортной безопасности, можно считать получение различных вариантов ОСПТБ, соответствующих требованиям максимизации технико-экономической эффективности их применения в целях своевременного и полного выполнения задач по обеспечению устойчивого и безопасного функционирования транспортного комплекса, а также защиты интересов личности, общества и государства в сфере транспортного комплекса от актов незаконного вмешательства с одной стороны и минимизации затрат на их создание (содержание) с другой. Исходя из этого, суть экономического обоснования мероприятий оптимизации организационной структуры и состава подразделений транспортной безопасности заключается в поиске таких вариантов организации и технического оснащения ПТБ, которые смогли бы решать возложенные на них задачи не только при «застывших», детерминированных условиях функционирования, но и в случае изменения этих условий с минимальными затратами на реализацию адаптационных мероприятий [7–11].

**2. Основная часть.** Одним из направлений сокращения потерь станет оптимизационная задача распределения ресурсов на транспортном предприятии, направленная на повышение рентабельности и безопасности пассажиро- и грузоперевозок, которая может быть сведена к задаче о раскраске графов.

В данной работе модифицирован и программно реализован алгоритм раскраски графа с максимальной загрузкой на заданные цвета. В исходной постановке задачи на транспортном предприятии имеются человеко-ресурсы, работу которых необходимо спланировать таким образом, чтобы предприятие обеспечивало оптимальную безопасность грузоперевозок при минимальном количестве штатных единиц. Любые две несовместные работы не могут выполняться одновременно. Каждой работе ставится в соответствие вершина графа. Ребра графа отображают отображают несовместимые работы. Минимальное число штатных единиц принимается за хроматическое число графа. Поставим в соответствие множеству вершин множество интервалов. Рассмотрим алгоритм раскраски таких графов с максимальной загрузкой на один цвет.

Пусть заданы временные интервалы  $A_1, \dots, A_k$ :  $A_i = [x_i, y_i]$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $x_1 \leq \dots \leq x_k$ . Определим числовую последовательность  $P = (i_1, \dots, i_{2k})$ , которое содержит множество  $2k$  чисел  $x_i, y_i$ , где  $1 \leq i, j \leq k$ .

Поставим в соответствие множеству интервалов  $A_1, \dots, A_k$  граф  $G=(A, E)$ , вершины которого отображают интервалы  $A_i$ , причем  $\{A_i, A_j\} \in E$ , тогда и только тогда, когда  $A_i \cap A_j \neq \emptyset$ . Пусть оптимальным числом штатных единиц, необходимым для обеспечения транспортной безопасности предприятия, является число  $T$ , где  $T = \chi(G)$  – хроматическое число для графа  $G$ .

Последовательность  $P$  в упорядоченном виде представляется следующим образом:  $P = (1, 2, \dots, T_1, i_{1,(2)}, \dots, i_{j_2,(2)}, \dots, T_2, \dots, i_{1,(k+1)}, \dots, i_{j_{k+1},(k+1)}, T_k$ .

Введем обозначения  $\{1, 2, \dots, T_1\} = X_{(1)}, \dots, \{i_{X,(1)}, \dots, i_{X,(n)}\} = Y_{(n)}$ ,  $n = \overline{2, k}$ .

Определим множества  $\{L_{(i)}\}, i = \overline{1, k}$ , где  $L_{(1)} = T_{(1)}$ ,  $L_{(i)} = X_{(i-1)} \cup X_{(i)} \setminus Y_{(i-1)}$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Для минимальной раскраски вершин реализуем следующий алгоритм:

1. Выделить максимальное множество – клику  $T_{max}$ , в которой число элементов будет определять число цветов  $T$ .

2. Вершины клики  $T_{i \pm 1}$ , входящие в пересечение  $T_i \cap T_{i \pm 1}$ , получают цвета по клике  $T_i$ . Свободным вершинам назначаются каждый раз свободный цвет 1. Далее, если цвет 1 уже занят, то назначают свободный цвет 2, и так далее.

3. При получении вершины цвета  $T_i$ , остальные получают свою раскраску в соответствии с шагом 2, при максимальной загрузке одного цвета.

**3. Результаты исследования.** Реализация алгоритма на программном уровне выполняется следующим образом:

- ◆ описываются структуры для хранения графов в интервальном виде;
- ◆ описываются функции для подсчёта данных, необходимых для работы алгоритма;
- ◆ описываются функции для отображения графов на экране;
- ◆ создается главное окно алгоритма (рис. 1);
- ◆ считываются входные данные из главного окна;
- ◆ списывается основной цикл алгоритма, обрабатывающий события от главного окна, и реализующий запуск функций, описанных ранее.

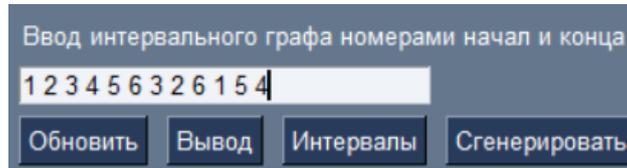


Рис. 1. Главное окно

Для хранения данных использовались:

- ◆ список множеств *clicks* для хранения максимальных клик графа;
- ◆ словарь *colors* для хранения цветов вершин.

Функции, непосредственно реализующие работу алгоритма:

- ◆ функция для подсчёта всех максимальных клик графа (рис. 2).

```
def get_clicks(input_nums):
    counter = -1
    sets_I_nom = 0
    sets_J_nom = 0

    sets_I = [set({}) for _ in range(len(input_nums))]
    sets_J = [set({}) for _ in range(len(input_nums))]
    uses = set({})
    anti_uses = set({})

    for num in input_nums:
        counter += 1
        if not num in uses:
            sets_J_nom += 1
            sets_I[sets_I_nom].add(num)
            uses.add(input_nums[counter])
            continue
        if not num in anti_uses:
            sets_I_nom += 1
            sets_J[sets_J_nom].add(num)
            anti_uses.add(input_nums[counter])
            continue

    sets_I = [click for click in sets_I if len(click) > 0]
    sets_J = [click for click in sets_J if len(click) > 0]

    clicks = []
    for i in range(len(sets_I)):
        if i == 0:
            clicks.append(sets_I[i])
        else:
            clicks.append(
                clicks[i - 1].union(sets_I[i]).difference(sets_J[i - 1])
            )

    return clicks
```

Рис. 2. Функция подсчёта максимальных клик

- ◆ функция раскраски графа по его максимальным кликам (рис. 3):

```
def get_clicks_color(clicks):
    ans = {}
    for click in clicks:
        current_colors = set({})
        for x in click:
            if x in ans:
                current_colors.add(ans[x])
            if ans.get(x) is None:
                color = 1
                while color in current_colors:
                    color += 1
                ans[x] = color
                current_colors.add(color)

    return ans
```

Рис. 3. Раскраска графа по кликам

- ◆ Функция вывода графа на экран (рис. 4):

```
def visualise_clicks(clicks, colors):
    import PySimpleGUI as sg

    layout = [
        [sg.Graph(canvas_size=(600, 600), graph_bottom_left=(-105, -105), graph_top_right=(105, 105),
            background_color='white', key='graph')]
    ]

    window = sg.Window('Раскрашенный граф', layout, grab_anywhere=True, finalize=True)
    graph = window['graph']

    y_count, x_count = 0, 0
    while y_count * x_count < len(colors):
        y_count += 1
        x_count += 1

    cords = {dot: get_dot_cords(len(colors), dot) for dot in colors}
    multiplier = 80
    for dot in cords:
        graph.draw_point(tuple([(n * multiplier) for n in cords[dot]]), size=5)
        graph.draw_text(f'{{dot}}({colors[dot]}}', tuple([(n * (multiplier + 10)) for n in cords[dot]]))

    for click in clicks:
        listed_click = list(click)
        for i in range(len(listed_click) - 1):
            for to_dot in listed_click[i + 1:]:
                graph.draw_line(point_from=tuple([(n * multiplier) for n in cords[listed_click[i]]]),
                    point_to=tuple([(n * multiplier) for n in cords[to_dot]]))

    window.read()
    window.close()
```

Рис. 4. Вывод графа на экран

- ◆ функция подсчёта координат точки, в зависимости от её номера и общего количества точек (рис. 5):

```
def get_dot_cords(count, current_number):
    step = (2 * math.pi) / count
    return math.sin(step * current_number), math.cos(step * current_number)
```

Рис. 5. Генерация координат точки

- ◆ функция вывода интервального графа на экран (рис. 6):

```
def visualise_interval(input_nums):
    import PySimpleGUI as sg

    layout = [
        [sg.Graph(canvas_size=(1400, 700), graph_bottom_left=(-105, -105), graph_top_right=(105, 105),
            background_color='white', key='graph')]
    ]

    window = sg.Window('Интервальный граф', layout, grab_anywhere=True, finalize=True)

    cords = {}

    cur_cord = 1
    for x in input_nums:
        if cords.get(x) is None:
            cords[x] = [(cur_cord, len(input_nums) - x)]

            else:
                cords[x].append((cur_cord, len(input_nums) - x))
            cur_cord += 0.6

    multiplier = 1400 / (len(input_nums) / 2) / 15

    for cord in cords:
        window['graph'].draw_line(point_from=tuple(
            [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][0]]
        ),
            point_to=tuple(
                [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][1]]
            ),
            width=3
        )
        window['graph'].draw_text(f'{{cord}}', tuple([(x * multiplier) - 102 for x in cords[cord][0]]))
        window['graph'].draw_line(point_from=tuple(
            [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][0]]
        ),
            point_to=((cords[cord][0][0] * multiplier) - 100, -80),
            width=1
        )
        window['graph'].draw_line(point_from=tuple(
            [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][1]]
        ),
            point_to=((cords[cord][1][0] * multiplier) - 100, -80),
            width=1
        )

    window.read()
    window.close()
```

Рис. 6. Алгоритм вывода интервального графа

- ◆ функция генерации псевдослучайного графа с заданным количеством точек (рис. 7):

```
def generate_random_graph(nums: int) → str:
    list_I = [x + 1 for x in range(nums)]
    list_J = [x + 1 for x in range(nums)]
    list_ans = []

    while len(list_I) > 0 or len(list_J) > 0:
        select = random.randint(0, 1)
        if select == 0 and len(list_I) > 0:
            list_ans.append(list_I[0])
            del list_I[0]
        elif len(list_J) > 0:
            rand_choose = random.randrange(0, len(list_J))
            if list_J[rand_choose] in list_ans:
                list_ans.append(list_J[rand_choose])
                del list_J[rand_choose]
            else:
                list_ans.append(list_J[rand_choose])
                del list_J[rand_choose]

    return ' '.join(list(map(str, list_ans)))
```

Рис. 7. Генерация нового графа

- ◆ функция, вызывающее диалоговое окно (рис. 8):

```
def ask(thing: str) → str:
    import PySimpleGUI as sg

    layout = [
        [sg.Text(f'Ввод {thing}:')],
        [sg.Input(key='input')],
        [sg.Button('Ввод')]
    ]

    win = sg.Window(title='Ввод', layout=layout)
    ans = win.read()[1]['input']
    win.close()
    return ans
```

Рис. 8. Вызов диалогового окна

- ◆ функция для вывода информации (клики, цвета, количество цветов, исходный интервал) в стандартный вывод и главное окно (рис. 9):

```
def print_reload(win_local, nums_local):
    clicks = get_clicks(list(map(int, nums_local.split())))
    colors = get_clicks_color(clicks)
    max = 0
    for i in colors:
        if colors[i] > max:
            max = colors[i]
    string_colors = "\n".join([f'x{0}→x{1}' for x in colors.items()])
    win_local['click_output'].update(f'Клики: {clicks}\nЦвета: {max}\n\nЦвета: \n{string_colors}')
    print(f'Интервалы: {nums_local}\nКлики: {clicks}\nЦвета: {max}\n\nЦвета: \n{string_colors}')
    return clicks, colors
```

Рис. 9. Вывод информации

- ◆ функция вывода на экран решения, интервального и раскрашенного графов в одном окне (рис. 10, 11):

```
def visualise_task(clicks, colors, input_nums):
    layout = [
        [sg.Frame(layout=[sg.Graph(canvas_size=(1000, 700), graph_bottom_left=(-105, -105), graph_top_right=(105, 105),
            background_color='white', keys='interval')], title="Интервальный граф",
            background_color='white', title_color='black'),
            sg.Frame(layout=[sg.Graph(canvas_size=(400, 400), graph_bottom_left=(-105, -105), graph_top_right=(105, 105),
            background_color='white', keys='graph'),
            [sg.Text("Продолжи быть ответом", keys='ans', background_color='white', text_color='black',
            size=(400, 0))], title='Ответы',
            background_color='white',
            title_color='black')],
            title_color='black')],
        ]

    window = sg.Window('Гороскоп задан', layout, grab_anywhere=True, finalize=True, background_color='white')
    window.maximize()

    graph = window['graph']
    y_count, x_count = 0, 0
    while y_count + x_count < len(colors):
        y_count += 1
        x_count += 1

    cords = [(dot: get_dot_cords(len(colors), dot) for dot in colors)]
    multiplier = 80
    for dot in cords:
        graph.draw_point(tuple([(n + multiplier) for n in cords[dot]], size=5)
        graph.draw_text(f'dot:{colors[dot]}', tuple([(n * (multiplier + 10)) for n in cords[dot]]))

    for click in clicks:
        listed_click = list(click)
        for i in range(len(listed_click) - 1):
            for to_dot in listed_click[i + 1]:
                graph.draw_line(point=tuple([(n + multiplier) for n in cords[to_dot]]),
                point_to_tuple([(n * multiplier) for n in cords[click[i]])])

    cords = []
    cur_cord = 1
    for x in input_nums:
        if cords.get(x) is None:
            cords[x] = [(cur_cord, len(input_nums) - x)]
        else:
            cords[x].append((cur_cord, len(input_nums) - x))
        cur_cord += 1
    multiplier = 1600 / (len(input_nums) / 2) / 15
```

Рис. 10. Вывод интервального графа

```

for cord in cords:
    window['interval'].draw_line(point_from=tuple(
        [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][0]]
    ),
        point_to=tuple(
            [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][1]]
        ),
        width=3
    )
    window['interval'].draw_text(f'{cord}', tuple([(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][0]]))
    window['interval'].draw_line(point_from=tuple(
        [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][0]]
    ),
        point_to=((cords[cord][0][0] * multiplier) - 100, -40),
        width=1
    )
    window['interval'].draw_line(point_from=tuple(
        [(x * multiplier) - 100 for x in cords[cord][1]]
    ),
        point_to=((cords[cord][1][0] * multiplier) - 100, -40),
        width=1
    )
    window['interval'].draw_text(f'{cord}', location=((cords[cord][0][0] * multiplier) - 100, -43))
    window['interval'].draw_text(f'{cord}', location=((cords[cord][1][0] * multiplier) - 100, -43))

max = 0
for i in colors:
    if colors[i] > max:
        max = colors[i]
window['ans'].update(
    f'Интервалы: {"".join(list(map(str, input_nums)))}\nКлики: {clicks}\nЦвета: {max}\n\nЦвета: \n{colors}'))
window.read()

```

Рис. 11. Вывод раскрашенного графа

При запуске алгоритма иницируется главное окно (рис. 12) и запускается основной цикл алгоритма (рис. 13):

```

import PySimpleGUI as sg

layout = [
    [sg.Text("Ввод интервального графа номерами начал и конца", tooltip="Например: '1 2 3 2 1 4 5 6 3 6 4 5'")],
    [sg.Input(size=(30, 8), key='main_input', default_text='1 2 3 2 1 4 5 6 3 6 4 5')],
    [sg.Button("Обновить", key='reload'), sg.Button("Вывод", key='print'), sg.Button("Интервалы", key='interval'),
    sg.Button("Сгенерировать", key='generate')],
    [sg.Text(key='click_output', size=(30, 20))]
]

win = sg.Window("Интервальный граф", layout=layout)

```

Рис. 12. Создание главного окна

```

while True:
    event, values = win.read()
    if event == sg.WINDOW_CLOSED:
        break

    if event == 'reload':
        print_reload(win, values['main_input'])

    if event == 'print':
        win.hide()
        visualise_clicks(*print_reload(win, values['main_input']))
        win.un_hide()

    if event == 'generate':
        nums = int(ask("максимально число:"))

        new_input = generate_random_graph(nums)
        win['main_input'].update(new_input)
        visualise_task(*print_reload(win, new_input), list(map(int, new_input.split())))

    if event == 'interval':
        visualise_interval(list(map(int, values["main_input"].split())))

```

Рис. 13. Основной цикл

После ввода пользователем входных данных и нажатия кнопки «Вывод» последовательно выполняются функции вывода информации в терминал и главное окно (рис. 14, 15) и вывод раскрашенного графа (рис. 16):

```

Интервалы: 1 2 3 2 1 4 5 6 3 6 4 5
Клики: [{1, 2, 3}, {3, 4, 5, 6}]
Цвета: 4

Цвета:
1→1
2→2
3→3
4→1
5→2
6→4

```

Рис. 14. Вывод информации в терминал

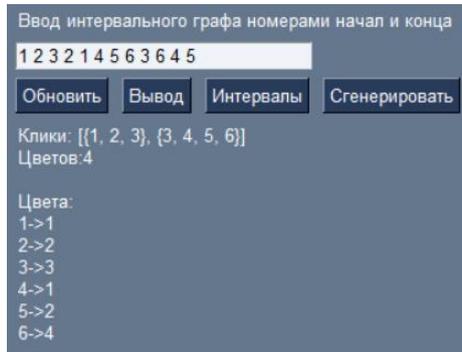


Рис. 15. Вывод информации в главное окно

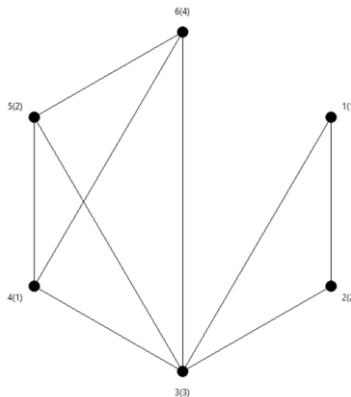


Рис. 16. Вывод раскрашенного графа

При нажатии кнопки «Интервалы» выполняется функция вывода интервального графа (рис. 17):

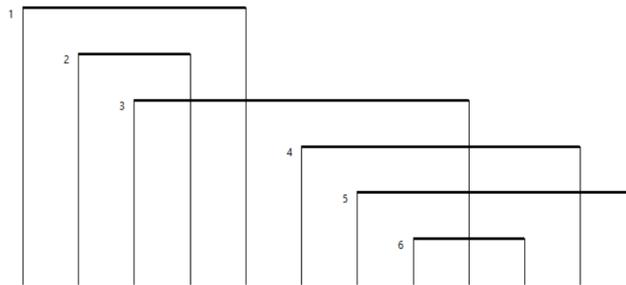


Рис. 17. Вывод интервалов

При нажатии кнопки «Сгенерировать» происходит вывод диалогового окна (рис. 18), после ввода данных и нажатия кнопки «Ввод» в нём выполняется функция генерации псевдослучайного графа, замена входных данных в главном окне на соответствующие новому графу, вывод интервального и раскрашенного графа в одном окне (рис. 19) и печать информации в терминал.

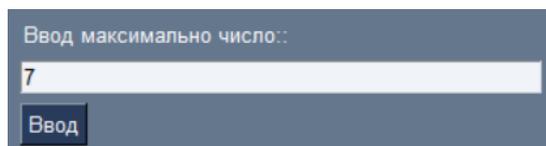


Рис. 18. Диалоговое окно

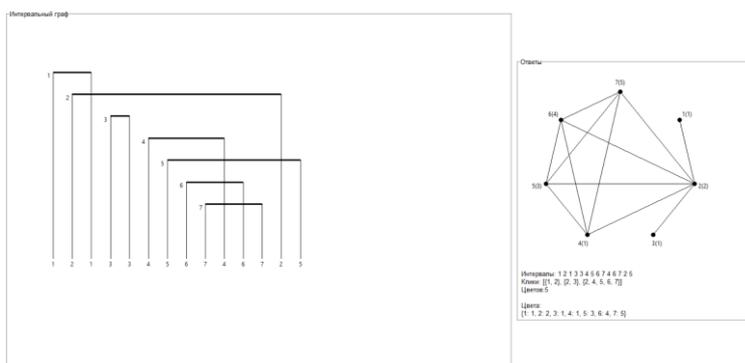


Рис. 19. Комбинированный вывод

**Выводы.** Разработанное программное средство позволяет пользователю на предприятии, вводя временные интервалы занятости, получать оптимально возможное распределение с максимальной загрузкой определенных ресурсных единиц. Такой способ распределения цветов в графе повышает показатели бережливого производства, позволяет определить максимально оптимальный кадровый состав для обеспечения безопасности перевозок. Для выбора мероприятий оптимизации, при помощи представленного в работе программного средства, появилась возможность сформировать различные варианты оргструктур ПТБ для каждого из  $n$ -сочетаний условий их создания и функционирования, а затем выбрать лучший из этих вариантов по критерию минимизации затрат на создание, функционирование и адаптацию искомого варианта ОСПТБ к новым условиям выполнения задач по обеспечению транспортной безопасности.

**Обсуждения.** Представленные результаты могут быть использованы как непосредственно самими субъектами транспортной инфраструктуры [12–15], так и в системах управления предприятий и организаций, осуществляющих свою деятельность в области обеспечения транспортной безопасности, в агрегаторах грузоперевозок и логистических отделах различных компаний [16–20]. Возможно построение различных оптимальных вариантов организационных структур и подразделений транспортной безопасности с минимальными затратами на организацию процессов перевозок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов А.О., Леонов С.И. Возможности оказания отдельных государственных услуг в области обеспечения транспортной безопасности в условиях специального регулирования // Техник транспорта: образование и практика. – 2020. – Т. 1, № 4. – С. 376-379. – Doi: 10.46684/2687-1033.2020.4.376-379.
2. Леонов С.И. Об использовании опционных договоров в деятельности подразделений транспортной безопасности // Транспортное право и безопасность. – 2019. – № 2 (30). – С. 58-62.

3. *Блинов П.Н., Томилов В.В.* Особенности организации работ по транспортной безопасности на железнодорожных предприятиях, не являющихся объектами транспортной инфраструктуры // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Матер. научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 07 февраля 2020 г. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 122-128.
4. *Лазарев Ю.Г., Симонов Д.Л., Григорьева Ю.А.* Логистика сервиса ассистанс на основе формирования эффективной организационной структуры предприятий // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 1 (31). – С. 70-75.
5. *Прокофьев Ю.В., Кобзарь А.А., Волошин В.Г.* Математическая модель обоснования количества устройств досмотра на объекте транспорта // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 1-2 (79-80). – С. 7-10.
6. *Прокофьев Ю.В., Андрушко С.Б., Кобзарь А.А.* Математическая модель поражения персонала объекта транспорта в результате террористических актов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 3-4 (69-70). – С. 51-56.
7. *Lyashenko Yu.M., Revyakina E.A., Shurygin D.N.* Application of the laws of mechanics of granulated solids in studies to Lader bucket interaction with bulk // Materials Stack Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206 (Cover date: 2017). – P. 1388-1394.
8. *Volokhov A., Fisenko K.* Experimental research of the directional stability characteristics of a passenger car when moving around // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – P. 052-074. – Doi: 10.1088/1757-899X/971/5/052074.
9. *Akhverdiev K.S., Kolesnikov I.V., Mukutadze M.A., Lagunova E.O.* Calculated model of wedge-shaped sliding supports in turbulent friction regime // International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering". Advances in Engineering Research (AER). – 2018. – Vol. 157. – P. 346-353.
10. *Shapovalov V.V., Kharlamov P.V., Zinovev V.E.* Application of methods physical and mathematical modeling for a research of nonlinear mechanical systems on the example of the rolling stock // AIP Conference Proceedings. – Rostov-on-Don: DSTU, 2019. – <https://doi.org/10.1063/1.5138391>.
11. *Shapovalov V.V., Kharlamov P.V., Gorin S.L., Mischinenko V.B., Kornienko R.A., Zinovev V.E.* Optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems // 16 International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". – Rostov-on-Don: DSTU, 2020. – P. 321-327.
12. *Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O.* Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). Advances in Engineering Research. – Vol. 158. – P. 246-253.
13. *Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Zadorozhnaya N.S.* Mathematical analysis of the model of a low-melting metal coating on the surface of the guide // International Conference Aviation Engineering and Transportation (AviaEnT 2020) at 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012023 doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012023.
14. *Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O.* Mathematical Model of Wedge-Shaped Sliding Support in Presence of Structure with Adapted Supporting Profile and Fusible Metal Coating of Guide Surface / In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – P. 1161-1170.
15. *Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O.* Mathematical model of a radial bearing with a low-melting metal coating of design models of hydrodynamic viscoelastic lubricant formed by melting the surface of a bearing bush coated with a metallic low-melting // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 760. – P. 012002. IOP Publishing. Doi:10.1088/1757-899X/760/1/012002.
16. *Ярыгин С.В.* Обучение безопасности. Организация подготовки сил обеспечения транспортной безопасности на железнодорожном транспорте и метрополитене имеет проработанный в деталях подход // Транспортная безопасность и технологии. – 2016. – № 4. – С. 100-101.
17. *Ермошин Н.А.* Оптимизационно-имитационный подход к формированию транспортно-логистических систем // Логистика: Современные тенденции развития: Матер. XXII Международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбГЭУ, 2013. – С. 151-154.

18. Волкова А.А., Никитин Ю.А., Плотников В.А. Развитие цифровых информационных систем в логистике. Кластеризация цифровой экономики: теория и практика: монография / под ред. А.В. Бабкина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 583-602. – Doi: 10.18720/IEP/2020.6/23.
19. Зубова Л.В., Коровин Э.В., Зубов А.О. Модель принятия управленческих решений, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций различного характера // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций: Матер. XI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 сентября 2019 г. / Сост.: Зыков А.В., Федорова Н.В. – СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. – С. 32-36.
20. Св. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611604 Российская Федерация. Имитационная модель расчёта укрупнённых нормативов при проведении обследования станций на железной дороге: № 2020663512: заявл. 02.11.2020: опубл. 02.02.2021 / Сергеев А.А., Ломов В.А., Завальнюк С.И., Рыбицкий В.А.; заяв. Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации.

## REFERENCES

1. Ivanov A.O., Leonov S.I. Vozможности okazaniya otdel'nykh gosudarstvennykh uslug v oblasti obespecheniya transportnoy bezopasnosti v usloviyakh spetsial'nogo regulirovaniya [The possibility of providing certain public services in the field of transport security in the conditions of special regulation], *Tekhnik transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice], 2020, Vol. 1, No. 4, pp. 376-379. Doi 10.46684/2687-1033.2020.4.376-379.
2. Leonov S.I. Ob ispol'zovanii opsionnykh dogovorov v deyatel'nosti podrazdeleniy transportnoy bezopasnosti [On the use of option contracts in the activities of transport security units], *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport law and security], 2019, No. 2 (30), pp. 58-62.
3. Blinov P.N., Tomilov V.V. Osobennosti organizatsii rabot po transportnoy bezopasnosti na zheleznodorozhnykh predpriyatiyakh, ne yavlyayushchikhsya ob'ektami transportnoy infrastruktury [Features of the organization of work on transport security at railway enterprises that are not objects of transport infrastructure], *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Mater. nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Rossiyskoy nauki, Omsk, 07 fevralya 2020 g.* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science, Omsk, February 07, 2020]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2020, pp. 122-128.
4. Lazarev Yu.G., Simonov D.L., Grigor'eva Yu.A. Logistika servisa assistans na osnove formirovaniya effektivnoy organizatsionnoy struktury predpriyatiy [Logistics of the assistance service based on the formation of an effective organizational structure of enterprises], *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* [Technical and technological problems of service], 2015, No. 1 (31), pp. 70-75.
5. Prokofev Yu.V., Kobzar' A.A., Voloshin V.G. Matematicheskaya model' obosnovaniya kolichestva ustroystv dosmotra na ob'ekte transporta [Mathematical model of substantiation of the number of inspection devices at the transport facility], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2015, No. 1-2 (79-80), pp. 7-10.
6. Prokofev Yu.V., Andrushko S.B., Kobzar' A.A. Matematicheskaya model' porazheniya personala ob'ekta transporta v rezul'tate terroristicheskikh aktov [A mathematical model of the destruction of the personnel of a transport facility as a result of terrorist acts], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2014, No. 3-4 (69-70), pp. 51-56.

7. Lyashenko Yu.M., Revyakina E.A., Shurygin D.N. Application of the laws of mechanics of granulated solids in studies to Lader bucket interaction with bulk, *Materials Stack Procedia Engineering*, 2017, Vol. 206 (Cover date: 2017), pp. 1388-1394.
8. Volokhov A, Fisenko K. Experimental research of the directional stability characteristics of a passenger car when moving around, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 971, pp. 052-074. Doi: 10.1088/1757-899X/971/5/052074.
9. Akhverdiev K.S., Kolesnikov I.V., Mukutadze M.A., Lagunova E.O. Calculated model of wedge-shaped sliding supports in turbulent friction regime, *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering". Advances in Engineering Research (AER)*, 2018, Vol. 157, pp. 346-353.
10. Shapovalov V.V., Kharlamov P.V., Zinovev V.E. Application of methods physical and mathematical modeling for a research of nonlinear mechanical systems on the example of the rolling stock, *AIP Conference Proceedings*. Rostov-on-Don: DSTU, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5138391>.
11. Shapovalov V.V., Kharlamov P.V., Gorin S.L., Mischinenko V.B., Kornienko R.A., Zinovev V.E. Optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems, *16 International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems"*. Rostov-on-Don: DSTU, 2020, pp. 321-327.
12. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant, *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). Advances in Engineering Research*, Vol. 158, pp. 246-253.
13. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Zadorozhnaya N.S. Mathematical analysis of the model of a low-melting metal coating on the surface of the guide, *International Conference Aviation Engineering and Transportation (AviaEnT 2020) at 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1061 012023 doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012023.
14. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O. Mathematical Model of Wedge-Shaped Sliding Support in Presence of Structure with Adapted Supporting Profile and Fusible Metal Coating of Guide Surface, In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds), *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 1161-1170.
15. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O. Mathematical model of a radial bearing with a low-melting metal coating of design models of hydrodynamic viscoelastic lubricant formed by melting the surface of a bearing bush coated with a metallic low-melting, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 760, pp. 012002. IOP Publishing. Doi: 10.1088/1757-899X/760/1/012002.
16. Yarygin S.V. Obuchenie bezopasnosti. Organizatsiya podgotovki sil obespecheniya transportnoy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte i metropolitene imeet prorabotanny v detalyakh podkhod [Security training. The organization of training of forces to ensure transport security in railway transport and the metro has a well-developed approach in detail], *Transportnaya bezopasnost' i tekhnologii* [Transport security and technologies], 2016, No. 4, pp. 100-101.
17. Ermoshin N.A. Optimizatsionno-imitatsionnyy podkhod k formirovaniyu transportno-logisticheskikh sistem [Optimization and simulation approach to the formation of transport and logistics systems], *Logistika: Sovremennyye tendentsii razvitiya: Mater. XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Logistics: Modern development trends: Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: SPbGEU, 2013, pp. 151-154.
18. Volkova A.A., Nikitin Yu.A., Plotnikov V.A. Razvitie tsifrovyykh informatsionnykh sistem v logistike. Klasterizatsiya tsifrovoy ekonomiki: teoriya i praktika: monografiya [Development of digital information systems in logistics. Clustering of the digital economy: theory and practice: monograph], ed. by A.V. Babkina. Saint Petersburg: POLITEKH-PRESS, 2020, pp. 583-602. Doi: 10.18720/IEP/2020.6/23.
19. Zubova L.V., Korovin E.V., Zubov A.O. Model' prinyatiya upravlencheskikh resheniy, napravlennykh na preduprezhdenie chrezvychaynykh situatsiy razlichnogo kharaktera [A model for making managerial decisions aimed at preventing emergencies of various types], *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Sovremennyye metody i tekhnologii preduprezhdeniya i profilaktiki vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy: Mater. XI*

- Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 27 sentyabrya 2019 g.* [Security service in Russia: experience, problems, prospects. Modern methods and technologies of prevention and prevention of emergency situations: Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, September 27, 2019], Compiled by: Zykov A.V., Fedorova N.V. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy obrony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2019, pp. 32-36.
20. *Sergeev A.A., Lomov V.A., Zaval'nyuk S.I., Rybitskiy V.A.* Sv. o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2021611604 Rossiyskaya Federatsiya. Imitatsionnaya model' rascheta ukрупnennykh normativov pri provedenii obsledovaniya stantsiy na zheleznoy doroge [Certificate of state registration of a computer program No. 2021611604 Russian Federation. Simulation model for calculating enlarged standards when conducting a survey of stations on the railway]: No. 2020663512: declared 02.11.2020: published 02.02.2021; the applicant is the Federal State State Military Educational Institution of Higher Education "Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev" of the Ministry of Defense of the Russian Federation.

Статью рекомендовала к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Л.В. Черкесова.

**Пиневи́ч Елена Вита́льевна** – Донской государственный технический университет; e-mail: hpinevich@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79515170493; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

**Лисовский Вадим Станиславович** – e-mail: pliyznik@yandex.ru; тел.: +79515376747; кафедра кибербезопасности информационных систем; студент.

**Алтынов Дмитрий Сергеевич** – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: dimasya21@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79096515398; к.э.н.; доцент учебного центра транспортной безопасности.

**Pinevich Elena Vital'evna** – Don State technical University; e-mail: hpinevich@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79515170493; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Lisovsky Vadim Stanislavovich** – e-mail: pliyznik@yandex.ru; phone: +79515376747; the department of cybersecurity of information systems; student.

**Altynov Dmitry Sergeevich** – Rostov State Transport University; e-mail: altynov\_prav@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79096515398; cand. of econ. sc.; associate professor of Military training center.

УДК 51.74

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-54-64

**С.Г. Буланов**

## **АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕСТКИХ СИСТЕМ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

*Предложен метод анализа устойчивости в смысле Ляпунова систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод базируется на критериях устойчивости в виде необходимых и достаточных условий, полученных на основе векторно-матричных преобразований разностных схем численного интегрирования. Представлены разновидности критериев в мультипликативной, аддитивной и матричной форме. Конструкция критериев влечет возможность их программной реализации. Для повышения достоверности анализа устойчивости приближения решения, входящего в конструкцию критериев, находятся на основе кусочно-интерполяционной аппроксимации полиномами Лагранжа, преобразованными к форме с числовыми коэффициентами. Проведен программный и численный эксперимент по анализу устойчивости модели периодической реакции Белоусова-Жаботинского, относящейся к клас-*

*су жестких систем, при заданных начальных условиях. Анализ выполняется на основе представленных критериев и по результатам работы программы однозначно определяется характер устойчивости в режиме реального времени. На основе результатов эксперимента можно утверждать, что замена разностных приближений решения на кусочно-интерполяционные приближения повышает достоверность анализа устойчивости, сокращает время исследования, позволяет определять асимптотические свойства решения. В целом предложенный подход является альтернативой методам качественной теории дифференциальных уравнений и дает возможность в режиме реального времени достоверно установить характер устойчивости жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений.*

*Устойчивость по Ляпунову; анализ устойчивости жестких систем; решение жестких систем.*

**S.G. Bulanov**

### **STABILITY ANALYSIS OF RIGID SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS**

*A method for analyzing stability in the sense of Lyapunov for systems of ordinary differential equations is proposed. The method is based on stability criteria in the form of necessary and sufficient conditions obtained on the basis of vector-matrix transformations of difference numerical integration schemes. The varieties of criteria in multiplicative, additive and matrix form are presented. The design of the criteria implies the possibility of their programmatic realization. To increase the reliability of the stability analysis, the approximations of the solution included in the construction of the criteria are based on piecewise interpolation approximation by Lagrange polynomials converted to a form with numerical coefficients. A programming and numerical experiment is carried out to analyze the stability of the Belousov-Jabotinsky periodic reaction model, which belongs to the class of rigid systems, under given initial conditions. The analysis is carried out on the basis of the presented criteria and the results of the program clearly determine the nature of the stability in real time. Based on the results of the experiment, it can be argued that replacing the difference approximations of the solution with piecewise interpolation approximations increases the reliability of the stability analysis, reduces the study time, and makes it possible to determine the asymptotic properties of the solution. In general, the proposed approach is an alternative to the methods of the qualitative theory of differential equations and makes it possible to reliably determine the stability of rigid systems of ordinary differential equations in real time.*

*Lyapunov stability; analysis of the stability of rigid systems; solution of rigid systems.*

**Введение.** Анализ устойчивости по Ляпунову систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) необходимо производить при решении задач многих разделов механики, физики, теории автоматического регулирования, теории сложных систем [1–3]. С целью анализа, как правило, используются методы качественной теории устойчивости [4, 5]. В частности, эти методы используются при управлении движущимся объектом, для стабилизации движения спутника, при создании математических моделей механических систем с тонкостенными конструкциями, при управлении технологическими процессами, при выборе технологических параметров микросхем. Анализ устойчивости необходим при моделировании управления движением роботов, при создании авиационных и высотных строительных конструкций, в гидродинамике и химической кинетике, синергетике. Использование компьютерной техники для данного анализа целесообразно для ряда технологических, физических, механических, производственных и других процессов. В частности, теория и практика сверхоперативного управления приводит к необходимости достоверного анализа устойчивости средствами вычислительной техники [6–8].

В статье представлен метод, разрабатываемый с целью автоматизированного контроля устойчивости. В основе метода лежат критерии устойчивости, полученные на основе векторно-матричных преобразований разностных схем численного

интегрирования. Полученная, в ходе компьютерной реализации критериев, информация должна позволить сделать однозначный вывод о характере устойчивости исследуемой системы.

**Описание метода.** Рассматривается задача Коши для нелинейной системы ОДУ

$$\frac{dY}{dt} = F(t, Y), Y(t_0) = Y_0. \quad (1)$$

Предполагается, что существует  $\delta > 0$ , при котором выполнены все условия существования и единственности для невозмущенного решения на полупрямой  $[t_0, \infty)$  и для каждого его возмущения с начальным вектором из окрестности  $\|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \delta$ . Функция  $F(t, Y)$  определена, непрерывна и непрерывно дифференцируема по  $t$  в области  $R: \{t_0 \leq t < \infty; Y(t), \forall \tilde{Y}(t) : \|\tilde{Y} - Y_0\| \leq \delta\}$ .

В данных условиях величина возмущения решения задачи (1) методом Эйлера в форме с остаточным членом на произвольном промежутке  $[t_0, t]$  определяется из соотношения

$$\tilde{y}_{k(i+1)} - y_{k(i+1)} = \tilde{y}_{ki} - y_{ki} + \frac{f_k(t_i, \tilde{Y}_i) - f_k(t_i, Y_i)}{\tilde{y}_{ki} - y_{ki}} (\tilde{y}_{ki} - y_{ki}) h + w_{ki}, \quad w_{ki} = \tilde{q}_{ki} - q_{ki}, \quad (2)$$

где  $q_{ki}, \tilde{q}_{ki}$  остаточные члены формулы Тейлора для  $k$ -го компонента приближения [9].

Значение  $t \in [t_0, \infty)$  является произвольно фиксированным, при этом индекс  $i$  неограниченно растет одновременно с убыванием равномерного шага:

$$t = \text{const}, \quad t = t_{i+1}, \quad h = (t_{i+1} - t_0)/(i+1), \quad i = 0, 1, \dots$$

Рекуррентное преобразование (2) влечет

$$\tilde{y}_{k(i+1)} - y_{k(i+1)} = \prod_{\ell=0}^i (1 + D_{i-\ell}^{(k)} h) (\tilde{y}_{k0} - y_{k0}) + R_{0i}^{(k)},$$

$$R_{0i}^{(k)} = \sum_{r=0}^{i-1} \prod_{\ell=0}^r (1 + D_{i-\ell}^{(k)} h) w_{k(i-r-1)} + w_{ki},$$

где  $D_i^{(k)} = (f_k(t_i, \tilde{Y}_i) - f_k(t_i, Y_i)) / (\tilde{y}_{ki} - y_{ki})$ .

В рассматриваемых условиях выполняется соотношение [9]

$$\lim_{i \rightarrow \infty} R_{0i}^{(k)} = 0 \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

В [9] установлено, что имеет место

**Теорема 1.** Для устойчивости решения задачи (1) необходимо и достаточно, чтобы существовало  $\Delta_1, 0 < \Delta_1 \leq \delta$ , такое, что  $\forall \tilde{Y}(t), \tilde{Y}(t_0) = \tilde{Y}_0$ , при ограничении

$\|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_1$  выполняется неравенство

$$\left| \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + D_{i-\ell}^{(k)} h) \right| \leq c, \quad c = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (3)$$

Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно, чтобы выполнялось предыдущее утверждение и существовало  $\Delta_2 \leq \Delta_1$ , такое, что  $\|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2$  влечет

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + D_{i-\ell}^{(k)} h) \right| = 0 \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (4)$$

Поскольку для  $\forall t \in [t_0, \infty)$ ,  $\forall k \in \overline{1, n}$  справедливо соотношение

$$\frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}} = \prod_{\ell=0}^i (1 + D_{i-\ell}^{(k)} h)$$

то критерии устойчивости (3), (4) можно представить в виде:

$$\left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}} \right| \leq c, \quad c = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad k \in \overline{1, n}. \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}} \right| = 0, \quad k \in \overline{1, n}. \quad (6)$$

Критерии (5), (6) позволяют определить характер устойчивости, асимптотической устойчивости либо неустойчивости жестких систем ОДУ без использования методов качественной теории дифференциальных уравнений. Получены разновидности критериев (3)–(6) в матричной форме, на основе линеаризации системы (1) [10, 11], и в аддитивной форме в результате преобразований выражений критериев [12]:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{\ell=0}^i D_{i-\ell}^{(k)} h \leq c_1, \quad c_1 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad k \in \overline{1, n}.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{\ell=0}^i D_{i-\ell}^{(k)} h = -\infty, \quad k \in \overline{1, n}.$$

Конструкция критериев позволяет реализовать их программно и по численному изменению величины из левой части (5) делать вывод о характере устойчивости исследуемой системы. Это влечет возможность компьютерного анализа устойчивости в режиме реального времени [13, 14]. С целью уточнения разностных приближений возмущенного и невозмущенного решений, необходимых для применения критериев (5), (6) используется метод варьируемого кусочно-интерполяционного приближения решения системы ОДУ [15, 16].

Полином Лагранжа всегда можно представить в виде  $\Psi_{n_0}(t) = \sum_{\ell=0}^{n_0} a_\ell x^\ell$ , где

$$a_\ell = \sum_{j=0}^{n_0} \frac{f(t_j) d_{\ell j}}{G_{n_0 j}(j)}, \quad x = \frac{t - t_0}{h}.$$

Приближение решения и правой части (1) на

$[a, b] = \bigcup_{i=0}^{R-1} [a_i, b_i]$  сводится к последовательному приближению на подынтервалах

$$[a_i, b_i] = \bigcup_{j=0}^{P-1} [t_j, t_{j+1}], \quad P = 2^{k_0}, \quad k_0 = \{0, 1, \dots\}. \quad (7)$$

При каждом  $i \geq 1$  полагается  $y_k(a_i) = y_{k-1}(b_{i-1})$ ,  $y_k(a_0) = y_{k0}$ . На каждом подынтервале из (7) строится кусочно-интерполяционное приближение функции правой части (1). Количество подынтервалов  $P = 2^{k_0}$  и степень полинома  $n_0$  выбираются так, чтобы было минимальным значение

$$\delta_{kij}(t) = |\Psi_{kjn_0}(t) - f_k(t, z_{1j}(t), \dots, z_{nj}(t))|, \quad t \in [t_j, t_{j+1}],$$

$$j = \overline{0, P-1}, \quad k \in \overline{1, n},$$

где  $\Psi_{kjn_0}(t) \approx f_k(t, y_1, \dots, y_n)$ ,  $z_{kj}(t) = y_{kj} + \int_{t_j}^t \Psi_{kjn_0}(t) dt$  – полином с числовыми коэффициентами, приближающий искомое решение. При этом значения в узлах интерполяции на каждом подынтервале первоначально считаются равными значению в левой границе.

При каждом  $j$  подынтервал  $[t_j, t_{j+1}]$  из (7) разбивается на  $n_0$  равноотстоящих узлов с шагом  $h_0$ :

$$t_{jp} = t_j + ph_0, \quad p = \overline{0, n_0}, \quad h_0 = \frac{t_{j+1} - t_j}{n_0}.$$

Соответственно приближение правой части примет вид:

$$\Phi_{kjp} = f_k(t_{jp}, \bar{y}_{1jp}, \dots, \bar{y}_{njp}), \quad p = \overline{0, n_0}, \quad k \in \overline{1, n},$$

где  $\bar{y}$  обозначает вычисляемое приближение точного решения  $y$ . Далее строится полином Лагранжа степени  $n_0$ , который приводится к виду:

$$\Psi_{kjn_0}(t) = \sum_{\ell=0}^{n_0} a_{kj\ell} \left( \frac{t-t_{j0}}{h_0} \right)^\ell, \quad a_{kj\ell} = \sum_{p=0}^{n_0} \frac{\Phi_{kjp} d_{\ell p}}{G_{n_0 p}}. \quad (8)$$

Полином (8) приближает производную решения задачи (1). Приближение самого решения строится как первообразная от (8) с постоянной, принимающей значение  $\bar{y}_{kj0}$ . Приближение решения  $y_k(t)$  на  $j$ -м подынтервале находится по формуле

$$z_{kj}(t) = \bar{y}_{kj0} + h_0 \sum_{\ell=0}^{n_0} \frac{a_{kj\ell}}{\ell+1} \left( \frac{t-t_{j0}}{h_0} \right)^{\ell+1}. \quad (9)$$

Вычисление значений полинома (9) производится по схеме Горнера при  $x = \frac{t-t_{j0}}{h_0}$ :

$$z_{kj}(x) = \bar{y}_{kj0} + h \left( \dots \left( \left( \frac{a_{kjn_0}}{n_0+1} x + \frac{a_{kj(n_0-1)}}{n_0} \right) x + \frac{a_{kj(n_0-2)}}{n_0-1} \right) x + \dots + a_{kj0} \right) x.$$

Получаемые в процессе компьютерной реализации приближения решения целесообразно принять за новые уточненные значения для последующего интерполирования. Данный рекуррентный процесс позволяет существенно уточнить полученные приближения. Одновременно с приближением решения имеет место непрерывное на всем рассматриваемом интервале приближение производной от решения.

**Численный и программный эксперимент.** Эксперимент проводился с помощью ПК на базе процессора Intel(R) Core(TM) i5-4460 в среде программирования Delphi. Написаны программы, реализующие конструкции критериев (5), (6) [17, 18]. В ходе анализа устойчивости жестких нелинейных систем ОДУ для каждого уравнения системы вычисляется значение выражение из левой части критерия (5) и определяется векторная норма, численное поведение которой, определяет характер устойчивости системы. Приближенные значения возмущенного и невозмущенного решения, входящие в конструкцию критериев (5), (6) будут находиться на основе кусочно-интерполяционного метода.

В качестве жесткой задачи исследуется модель периодической реакции Белоусова-Жаботинского [19]

$$y_1' = 77.27(y_2 + y_1(1 - 8.375 \cdot 10^{-6} y_1 - y_2)), y_2' = 77.27^{-1}(y_3 - y_2(1 + y_1)), y_3' = 0.161(y_1 - y_3). \quad (10)$$

Система (10) относится к таким, которые затруднительно решить с высокой точностью классическими методами. Причина заключается в периодических резких скачках на несколько порядков значений решения на коротких промежутках. Решение таких систем традиционно выполняется с помощью специализированных программ, например в [19] представлено решение системы (10) с помощью программы RODAS, основанной на методе Розенброка. В статье система (10) решается с помощью кусочно-интерполяционного метода с параметрами  $n_0 = 2$  – степень полинома,  $k_0 = 10$ ,  $2^{k_0}$  – количество подынтервалов,  $\nabla = 0.01$  – длина подынтервала.

Первоначально анализ устойчивости выполняется на основе критериев (5), (6) при начальных условиях  $y_1(0) = 1$ ,  $y_2(0) = 2$ ,  $y_3(0) = 3$  на промежутке  $[0, 1000]$ . В этом случае у системы наблюдаются периодические устойчивые циклы. В табл. 1 представлены численные значения нормы (максимальное значение выражения критерия (5) при  $k \in \overline{1, n}$ ), соответствующие первому скачку на отрезке  $[0, 1000]$ . Время работы программы 5 мин., 41 с.

Таблица 1

Результаты анализа устойчивости системы (10) при начальных условиях

$$y_1(0) = 1, y_2(0) = 2, y_3(0) = 3$$

t	11	13	15	17	19
norma	3.262	4.693	7.639	16.153	84.062
t	21	23	25	27	29
norma	$3.986 \times 10^5$	$1.843 \times 10^6$	$7.682 \times 10^4$	$5.567 \times 10^4$	$4.034 \times 10^4$
t	31	33	35	37	39
norma	$2.924 \times 10^4$	$2.119 \times 10^4$	$1.535 \times 10^4$	$1.112 \times 10^4$	$8.065 \times 10^3$
t	41	43	45	47	49
norma	$5.845 \times 10^3$	$4.235 \times 10^3$	$3.069 \times 10^3$	$2.224 \times 10^3$	$1.612 \times 10^3$

Ограниченное изменение значений нормы в соответствии с критерием (5) следует трактовать как устойчивость решения системы (10).

Характер поведения нормы на всем промежутке  $[0, 1000]$  приводится на рис. 1.

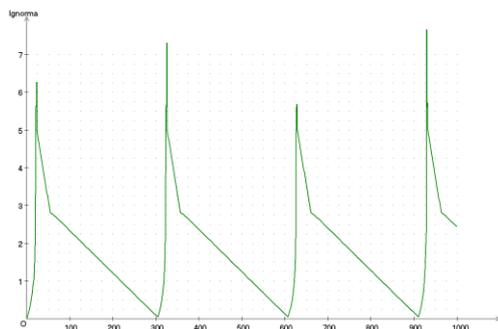


Рис. 1. Колебание значений нормы при анализе устойчивости системы (10) с начальными условиями  $y_1(0) = 1$ ,  $y_2(0) = 2$ ,  $y_3(0) = 3$

График решения  $y_1$  системы (10) представлен на рис. 2.

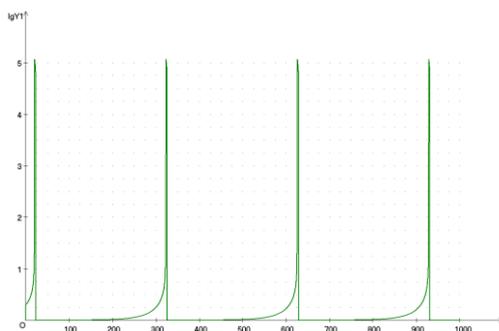


Рис. 2. Колебание решения  $y_1$  системы (10) при начальных условиях  $y_1(0) = 1$ ,  $y_2(0) = 2$ ,  $y_3(0) = 3$

Таким образом, на основе критериев (5), (6) достоверно определяется характер устойчивости жесткой системы (10). Время анализа существенно уменьшится, если увеличить длину подынтервала до единицы, за исключением участков всплеска значений решений.

Далее выполняется анализ устойчивости системы (10) при начальных условиях  $y_1(0) = 4$ ,  $y_2(0) = 1.1$ ,  $y_3(0) = 4$ . В табл. 2 представлены результаты численного эксперимента.

Таблица 2

Результаты анализа устойчивости системы (10) при начальных условиях  $y_1(0) = 4$ ,  $y_2(0) = 1.1$ ,  $y_3(0) = 4$

t	1	2	3	4	5
norma	$1.602 \times 10^4$	$1.781 \times 10^5$	$2.131 \times 10^5$	$4.495 \times 10^4$	$3.826 \times 10^4$
t	6	7	8	9	10
norma	$3.257 \times 10^4$	$2.773 \times 10^4$	$2.361 \times 10^4$	$2.009 \times 10^4$	$1.711 \times 10^4$
t	11	12	13	14	15
norma	$1.456 \times 10^4$	$1.239 \times 10^4$	$1.055 \times 10^4$	$8.985 \times 10^3$	$7.649 \times 10^3$
t	16	17	18	19	20
norma	$6.512 \times 10^3$	$5.543 \times 10^3$	$4.719 \times 10^3$	$4.017 \times 10^3$	$3.420 \times 10^3$

Как и в предыдущем случае, ограниченные колебания значений нормы свидетельствуют об устойчивости решения системы (10).

Таким образом результаты анализа устойчивости оказались в полном соответствии с известными оценками [19], что в частности свидетельствует о целесообразности применения данного метода на практике. Наряду с данным методом возможно применять подходы для оценки характера устойчивости представленные в [20–22]. Эти подходы, основаны на построении функций Ляпунова, допускают компьютерную реализацию.

**Заключение.** Представлен метод анализа устойчивости жестких систем ОДУ на основе критериев, полученных в результате векторно-матричных преобразований разностных схем численного интегрирования. Форма критериев позволяет реализовать их программно и тем самым автоматизировать процесс анализа устойчивости. При выполнении анализа устойчивости жестких нелинейных систем ОДУ необходимо находить значение возмущенного и невозмущенного решения с высокой степенью точности. Для достижения этой цели в работе используется метод кусочно-интерполяционного приближения решения и правой части системы полиномами Лагранжа с числовыми коэффициентами. Приближения решения, получаемые на этой основе, по точности превосходят приближения, получаемые на основе разностных методов. В дополнении к точности существенно сокращается время на вычисление требуемых приближений, что дает возможность проводить анализ устойчивости на промежутках существенно большей длины и устанавливать асимптотические свойства исследуемых систем ОДУ. На основе программного и численного эксперимента достоверно определяется характер устойчивости модели периодической реакции Белоусова-Жаботинского при заданных начальных условиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников Г.И., Мельников В.Г., Дударенко Н.А., Таланов В.В. Устойчивость движения нелинейных динамических систем при постоянно действующих возмущениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 216-221.
2. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 59. – С. 127-135.
3. Александров А.Ю., Жабко А.П., Косов А.А. Анализ устойчивости и стабилизация нелинейных систем на основе декомпозиции // Сибирский математический журнал. – 2015. – Т. 56, № 6. – С. 1215-1233.
4. Hammarling S.J. Numerical solution of the stable, non-negative definite Lyapunov equation // IMA J. of Num. Analysis. – 1982. – Vol. 2, Issue 3. – P. 303-323.
5. Luuyckx L., Locufier M., Noldus E. Computational methods in nonlinear stability analysis: stability boundary calculations // J. Comput. Appl. Math. – 2004. – Vol. 168, Issue 12. – P. 289-297.
6. Giesl P., Hafstein S. Computation of Lyapunov functions for nonlinear discrete time systems by linear programming // J. Difference Equ. Appl. – 2014. – Vol. 20, Issue 4. – P. 610-640.
7. Olgac N., Sipahi R. A practical method for analyzing the stability of neutral type LTI-time delayed systems // Automatica. – 2004. – Vol. 40, Issue 5. – P. 847-853.
8. Hafstein S. A constructive converse Lyapunov theorem on asymptotic stability for nonlinear autonomous ordinary differential equations // Dynamical Systems. – 2005. – Vol. 20. – P. 281-299.
9. Ромм Я.Е. Компьютерно-ориентированный анализ устойчивости на основе рекуррентных преобразований разностных решений обыкновенных дифференциальных уравнений // Кибернетика и системный анализ. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 107-124.
10. Буланов С.Г. Анализ устойчивости систем линейных дифференциальных уравнений на основе преобразования разностных схем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 9. – С. 542-549.

11. Ромм Я.Е., Буланов С.Г. Программные критерии устойчивости решения задачи Коши для систем линейных дифференциальных уравнений на основе разностных схем численного интегрирования // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Специальный выпуск «Математическое моделирование и компьютерные технологии». – 2004. – С. 75-80.
12. Ромм Я.Е., Буланов С.Г. Численный эксперимент по компьютерному анализу устойчивости решений обыкновенных дифференциальных уравнений на основе критериев матричного вида // Деп. в ВИНТИ. – 14.08.17. – № 89. – 20 с.
13. Ромм Я.Е., Буланов С.Г. Компьютерный анализ устойчивости систем линейных дифференциальных уравнений с нелинейной добавкой // Деп. в ВИНТИ. – 11.03.10. – № 147. – 33 с.
14. Ромм Я.Е. Моделирование устойчивости по Ляпунову на основе преобразований разностных схем решений обыкновенных дифференциальных уравнений // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20, № 12. – С. 105-118.
15. Ромм Я.Е., Джанунц Г.А. Кусочная интерполяция функций, производных и интегралов с приложением к решению обыкновенных дифференциальных уравнений // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12 (часть 2). – С. 291-316.
16. Джанунц Г.А., Ромм Я.Е. Варьируемое кусочно-интерполяционное решение задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с итерационным уточнением // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2017. – Т. 57, № 10. – С. 1641-1660.
17. Ромм Я.Е. Компьютерно-ориентированный анализ устойчивости решений дифференциальных систем // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 4. – С. 42-63.
18. Bulanov S.G. Computer analysis of differential systems stability based on linearization and matrix multiplicative criteria // Journal of Physics: Conf. Series. – 2021. – 1902 012101.
19. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. – М.: Мир, 1999. – 685 с.
20. Doban A., Lazar M. Computation of Lyapunov functions for nonlinear differential equations via a Yoshizawa-type construction // 10th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems NOLCOS: IFAC-PapersOnLine. – 2016. – P. 29-34.
21. Zhaolu T., Chuanqing G. A numerical algorithm for Lyapunov equations // J. Appl. Math. Comput. – 2008. – Vol. 202, Issue 1. – P. 44-53.
22. Xiao-Lin L., Yao-Lin J. Numerical algorithm for constructing Lyapunov functions of polynomial differential systems // J. Appl. Math. Comput. – 2009. – Vol. 29, Issue 1-2. – P. 247-262.

## REFERENCES

1. Mel'nikov G.I., Mel'nikov V.G., Dudarenko N.A., Talapov V.V. Ustoychivost' dvizheniya nelineynykh dinamicheskikh sistem pri postoyanno deystvuyushchikh vozmushcheniyakh [stability of nonlinear dynamical system motion under constantly acting perturbations], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2019, Vol. 19, No. 2, pp. 216-221.
2. Mironov V.V., Mitrokhin Yu.S. Tekhnologicheskij podkhod k issledovaniyu ustoychivosti dinamicheskikh sistem: prikladnye voprosy [Constructive approach to the research of dynamic systems stability: applied problems], *Vestnik RGRTU* [Vestnik of RSREU]. 2017, No. 59, pp. 127-135.
3. Aleksandrov A.Yu., Zhabko A.P., Kosov A.A. Analiz ustoychivosti i stabilizatsiya nelineynykh sistem na osnove dekompozitsii [Analysis of stability and stabilization of nonlinear systems via decomposition], *Sibirskiy matematicheskij zhurnal* [Siberian mathematical journal]. 2015, Vol. 56, No. 6, pp. 1215-1233.
4. Hammarling S.J. Numerical solution of the stable, non-negative definite Lyapunov equation, *IMA J. of Num. Analysis*, 1982, Vol. 2, No. 3, pp. 303-323.
5. Luyckx L., Locufier M., Noldus E. Computational methods in nonlinear stability analysis: stability boundary calculations, *J. Comput. Appl. Math.*, 2004, Vol. 168, No. 12, pp. 289-297.
6. Giesl P., Hafstein S. Computation of Lyapunov functions for nonlinear discrete time systems by linear programming, *J. Difference Equ. Appl.*, 2014, Vol. 20, No. 4, pp. 610-640.

7. *Olgac N., Sipahi R.* A practical method for analyzing the stability of neutral type LTI-time delayed systems, *Automatica*, 2004, Vol. 40, No. 5, pp. 847-853.
8. *Hafstein S.* A constructive converse Lyapunov theorem on asymptotic stability for nonlinear autonomous ordinary differential equations, *Dynamical Systems*, 2005, Vol. 20, pp. 281-299.
9. *Romm Ya.E.* Komp'yuterno-orientirovanny analiz ustoychivosti na osnove rekurrentnykh preobrazovaniy raznostnykh resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Computer-oriented stability analysis based on recurrent transformation of difference solutions of ordinary differential equations], *Kibernetika i sistemnyy analiz* [Cybernetics and Systems Analysis], 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 107-124.
10. *Bulanov S.G.* Analiz ustoychivosti sistem lineynykh differentsial'nykh uravneniy na osnove preobrazovaniya raznostnykh skhem [Stability analysis of systems of linear differential equations based on transformation of difference schemes], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2019, Vol. 20, No. 9, pp. 542-549.
11. *Romm Ya.E., Bulanov S.G.* Programmye kriterii ustoychivosti resheniya zadachi Koshi dlya sistem lineynykh differentsial'nykh uravneniy na osnove raznostnykh skhem chislenного integrirovaniya [Program stability criteria for the solution of the Cauchy problem for systems of linear differential equations based on difference numerical integration schemes], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. Spetsial'nyy vypusk «Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternye tekhnologii»* [University news. North-caucasian region. Technical sciences series. Special issue «Mathematical Modeling and Computer Technologies»], 2004, pp. 75-80.
12. *Romm Ya.E., Bulanov S.G.* Chislennyy eksperiment po komp'yuternomu analizu ustoychivosti resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy na osnove kriteriev matrichnogo vida [Computer analysis of the stability of systems of linear differential equations with nonlinear addition], *Dep. v VINITI* [Dep. in VINITI], 14.08.17, No. 89, 20 p.
13. *Romm Ya.E., Bulanov S.G.* Komp'yuternyy analiz ustoychivosti sistem lineynykh differentsial'nykh uravneniy s nelineynoy dobavkoy [Computer analysis of the stability of systems of linear differential equations with nonlinear addition], *Dep. v VINITI* [Dep. in VINITI], 11.03.10, No. 147, 33 p.
14. *Romm Ya.E.* Modelirovanie ustoychivosti po Lyapunovu na osnove preobrazovaniy raznostnykh skhem resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Modeling of stability according to Lyapunov based on difference schemes transformations for solutions of ordinary differential equations], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 2008, Vol. 20, No. 12, pp. 105-118.
15. *Dzhanunts G.A.* Kusochnaya interpolyatsiya funktsiy, proizvodnykh i integralov s prilozheniem k resheniyu obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Piecewise interpolation of functions, derivatives and integrals with application to the solution of ordinary differential equations], *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2020, No. 12 (part 2), pp. 291-316.
16. *Dzhanunts G.A., Romm Ya.E.* Var'iruemoie kusochno-interpolyatsionnoe reshenie zadachi Koshi dlya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy s iteratsionnym utochneniem [The varying piecewise interpolation solution of the Cauchy problem for ordinary differential equations with iterative refinement], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal], 2017, Vol. 57, No. 10, pp. 1616-1634.
17. *Romm Ya.E.* Komp'yuterno-orientirovanny analiz ustoychivosti resheniy differentsial'nykh sistem [Computer-oriented stability analysis of solutions of differential systems], *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2020, No. 4, pp. 42-63.
18. *Bulanov S.G.* Computer analysis of differential systems stability based on linearization and matrix multiplicative criteria, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2021, 1902 012101.
19. *Khayrer E., Vanner G.* Reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy. Zhestkie i differentsial'no-algebraicheskie zadachi [Solving ordinary differential equations. Rigid and differential-algebraic problems]. Moscow: Mir, 1999, 685 p.
20. *Doban A., Lazar M.* Computation of Lyapunov functions for nonlinear differential equations via a Yoshizawa-type construction, *10th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems NOLCOS: IFAC-PapersOnLine*, 2016, pp. 29-34.

21. Zhaolu T., Chuanqing G. A numerical algorithm for Lyapunov equations, *J. Appl. Math. Comput.*, 2008, Vol. 202, No. 1, pp. 44-53.
22. Xiao-Lin L., Yao-Lin J. Numerical algorithm for constructing Lyapunov functions of polynomial differential systems, *J. Appl. Math. Comput.*, 2009, Vol. 29, No. 1-2, pp. 247-262.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

**Буланов Сергей Георгиевич** – Ростовский государственный экономический университет; e-mail: bulanovtgpri@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89094369543; доцент.

**Bulanov Sergei Georgievich** – Rostov State University of Economics; e-mail: bulanovtgpri@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: 89094369543; associate professor.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-64-71

**И.О. Шепель**

### **АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ В ОБЩУЮ КАРТУ ЗАНЯТОСТИ**

*В работе рассматривается проблема построения модели проходимости окружающего пространства в среде с большим количеством динамических объектов по данным от нескольких различных сенсоров. Целью работы является качественное улучшение алгоритма построения карты занятости путем добавления способа обработки данных как от существующих алгоритмов детектирования движущихся препятствий, так и от автомобильного радара миллиметрового диапазона. В исследовании решается задача объединения данных о статичном окружении и о динамических объектах в одну общую модель проходимости для дальнейшего планирования траектории движения. Представленная в статье модификация алгоритма способна комплексировать данные как карт занятости, построенных по трехмерному облаку точек от любого датчика, так и данные, представленные в виде массива трехмерных объектов с известными координатами, размерами и ориентацией. Комплексирование данных происходит на уровне построения карт занятости и не накладывает дополнительных требований на источник информации о динамических препятствиях. Алгоритм способен уточнять данные о позиции и размерах динамического объекта скоростью от радара, что позволяет планировать траекторию с учетом движения динамических объектов. Одновременное использование классического подхода к построению карт позволяет обнаруживать препятствия в случае ошибки алгоритма обнаружения динамических препятствий. Разработанный алгоритм работает в реальном масштабе времени на модуле Jetson AGX Xavier, и протестирован в реальных условиях на мобильной робототехнической платформе в автономном режиме. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований по улучшению представленного подхода.*

*Карта занятости; лидар; радар; облако точек; комплексирование данных; обнаружение препятствий; динамический объект; автономное движение.*

**I.O. Shepel**

### **ALGORITHM FOR COMPLEXING MULTIPLE DATA SOURCES INTO A SINGLE OCCUPANCY MAP**

*The paper deals with the problem of constructing a passability model of environment with a large number of dynamic objects based on data from several different sensors. The aim of the work is to improve the algorithm for constructing the occupancy map by adding data from both existing algorithms for moving obstacles detection and from millimeter-wave automotive radar. The study solves the problem of combining data on static environment and dynamic objects into one general passability model for further trajectory planning. The modification of the algorithm presented in the article is able to combine data from both occupancy maps based on a three-*

*dimensional point cloud from any sensor such as lidar or radar, and arrays of bounding boxes of objects with known coordinates, sizes, and orientation. Data aggregation occurs at the level of building occupancy maps and does not impose requirements on the source of information about dynamic obstacles. The algorithm is able to refine the data on the position and size of the dynamic object by speed from the radar, which allows to plan the trajectory taking into account the movement of dynamic objects. The parallel use of the classical approach allows to detect obstacles in the event of an error in the output of the dynamic obstacle detection algorithm. The developed algorithm works in real time on the Jetson AGX Xavier module, and is tested in real conditions on a mobile robotic platform in autonomous mode. Promising directions for further research to improve the presented approach are formulated.*

*Occupancy map; lidar; radar; point cloud; data complexing; obstacle detection; dynamic object; autonomous movement.*

**Введение.** В настоящее время активно развиваются автономные робототехнические платформы (РТП) на базе небольших шасси, которые должны быть способны к безаварийному движению в пешеходных зонах с большим количеством движущихся объектов, например для решения задачи доставки последней мили или уборки улиц. Подобные РТП сталкиваются с рядом проблем: большинство существующих наборов данных ориентировано на сферу беспилотных автомобилей, современные алгоритмы обнаружения препятствий также требуют большого набора различных сенсоров и высоких вычислительных мощностей, характерных для больших платформ. Кроме того, эти алгоритмы ориентированы на применение на дорогах общего пользования, которые отличаются высокой структурированностью и детерминированным характером движения окружающих объектов. Пешеходные зоны характеризуются большей плотностью объектов, хаотичным движением и отсутствием разметки, что сокращает применимость алгоритмов из сферы беспилотного транспорта. Кроме того, каждый из существующих сенсоров, используемых в сфере беспилотного транспорта, имеет свои границы применимости: так видимость лидаров существенно ограничивается во время снега и дождя, а радары имеют меньший угол обзора и разрешающую способность, но при этом измеряют скорость движения объектов напрямую.

В работе описана модификация алгоритма построения карты занятости по облаку точек от лидара, радара и массиву объектов, которые представлены в виде ограничивающих параллелепипедов с известными координатами и ориентацией. Ключевые отличия разработанного алгоритма следующие:

- ◆ реализованный алгоритм работоспособен в реальном масштабе времени;
- ◆ в качестве входных данных может использоваться выход целого ряда алгоритмов определения динамических препятствий, входное облако точек также может генерироваться любым сенсором (как лидаром и радаром, так и стереокамерой);
- ◆ в случае ошибки алгоритма обнаружения динамического объекта препятствие размечается классическим алгоритмом построения карты занятости;
- ◆ скорость динамических объектов на карте уточняется с помощью радара, а их положение и размеры – по лидару.

**Обзор существующих методов.** Карта занятости [1] является одним из самых распространенных методов для построения модели проходимости и решения задачи автономного движения наземной РТП. Большинство методов используют лидар как единственный источник данных и рассчитаны на применение в беспилотном транспорте [2, 3], в то время как подходы для небольших роботов чаще используют стереокамеры [4]. Для детекции динамических объектов в карте занятости, как правило, используются изображения с камер и нейросетевые подходы [5, 6]. Другое семейство алгоритмов для обнаружения динамики также использует сверточные сети, но в качестве входа подаются классические карты занятости [7, 8]. В то же время конкурсы по обнаружению и трекингу трехмерных движущихся

объектов [9, 10] показывают, что подавляющее большинство наиболее точных методов используют данные лидара и выдают информацию в виде вектора с координатами, ориентацией и размерами объекта [11, 12]. При этом существующие методы построения моделей проходимости не используют подобные решения для обработки динамических объектов. Автомобильные радары миллиметрового диапазона также активно применяются в задачах обнаружения препятствий беспилотному транспорту [13]. При этом комплексирование происходит либо на уровне «сырых» данных [14, 15], что не позволяет перейти к общей модели проходимости для планирования траектории; либо используются сверточные сети [16 – 18], которые требуют больших вычислительных мощностей, что затрудняет их использование на небольших робототехнических платформах. Подходы, которые комплексировать данные на уровне карт препятствий также существуют, однако в построении самой карты, как правило, участвуют только данные от лидаров, а цветовая информация используется как дополнительная, например, для кластеризации объектов [19].

**Алгоритм построения карты занятости.** В работе рассматривается проблема построения карты занятости с учетом движения динамических препятствий. В качестве метода для определения ограничивающих параллелепипедов объектов был выбран Centerpoint [20], как один из лучших по качеству и быстродействию на наборе данных nuScenes [10]. Детальное изучение таких подходов не входит в область интереса работы.

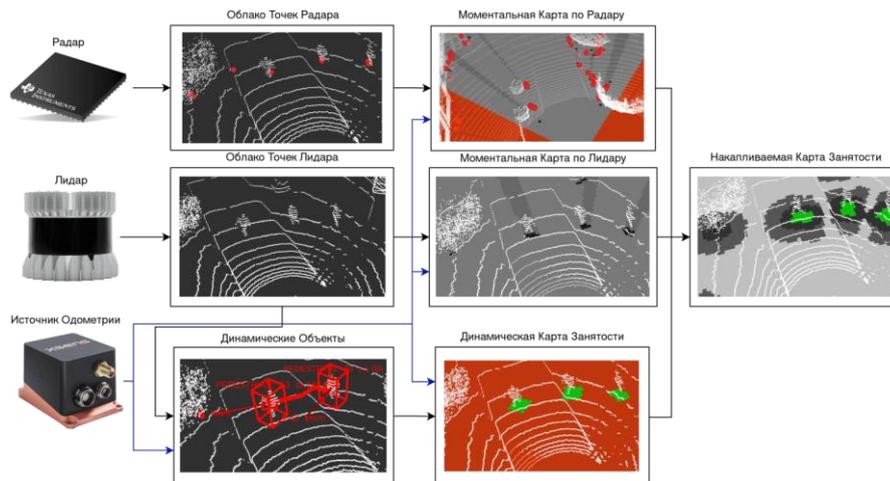


Рис. 12. Общая схема алгоритма

Представленный алгоритм (см. рис. 1) является развитием подхода, опубликованного автором в [21]. В оригинальной статье происходило объединение моментальных карт, синтезированных по данным от нескольких разнесенных в пространстве лидаров. В этой работе добавляется обработка облаков точек от радара и ограничивающих параллелепипедов объектов. Таким образом, на вход алгоритм может получать облака точек от радара, лидара, стереокамеры, а также массив векторов с информацией о динамических объектах, а на выходе алгоритм выдает общую карту проходимости.

Генерация карты проходимости происходит в два этапа. На первом этапе строятся моментальные карты проходимости, при этом каждая карта соответствует собственному источнику данных (дополнительно для динамической карты перед этим выполняется алгоритм построения ограничивающих параллелепипедов объектов). Решение, размеры, позиция и ориентация в пространстве всех моментальных карт

совпадает, что позволяет установить взаимно-однозначное соответствие между ячейками. Вся работа производится в локальных прямоугольных координатах, которые преобразуются из географических координат от источника одометрии. Центр всех моментальных карт совпадает с центром источника одометрии РТП, и при движении так же перемещается согласно т. н. подходу сворачиваемых карт [22].

Каждая ячейка моментальной карты вне зависимости от типа входных данных может пребывать в трех состояниях: быть свободной ( $p_F$ ), занятой препятствием ( $p_O$ ) или иметь неизвестный тип проходимости ( $p_U$ ). Точки из облака распределяются по ячейкам карты и сортируются по увеличению  $z$  координаты, затем каждой ячейке присваивается значение в соответствии с условием (1):

$$p_{cell} = \begin{cases} p_O, & \text{если } \alpha \wedge \beta \\ p_F, & \text{если } \gamma \\ p_U, & \text{если } \delta \end{cases}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= K > 1 \wedge z_K - z_1 < t_{obs}, \\ \beta &= \exists i: z_{i+1} - z_i > h_{UGV} \wedge z_i - z_1 < t_{obs}, \\ \gamma &= cell \in r^{(j)} \wedge D_{cell} < D_{occ}^{(j)}, \\ \delta &= cell \in r^{(j)} \wedge D_{cell} > D_{occ}^{(j)}. \end{aligned}$$

$\alpha$  определяет препятствия по порогу высоты  $t_{obs}$ ,  $\beta$  фильтрует нависающие препятствия по высоте РТП  $h_{UGV}$ . После выделения всех ячеек-препятствий выполняется трассировка лучей. Лучи  $R = \{r^{(j)}, j = 1, \dots, N\}$  строятся от координат сенсора на карте занятости с постоянным угловым разрешением, при этом измеряется расстояние до ближайшей ячейки-препятствия  $D_{occ}$ . Все ячейки на этом луче до препятствия помечаются как свободные (условие  $\gamma$ ), а после как неизвестные (условие  $\delta$ ). Все вероятности, присваиваемые ячейкам, подчиняются следующему соотношению:  $p_O > p_U > p_F$ . Изменение этих вероятностей влияет на скорость обновления статуса ячеек в накапливаемой карте, кроме того значения  $p_O$  и  $p_F$  для карты более «шумного» сенсора должны быть меньше соответствующих значений карты менее «шумного» сенсора.

Генерация карты с динамическими препятствиями производится с помощью простой проекции ограничивающих параллелепипедов на ячейки карты. В свою очередь ячейкам-препятствиям в моментальной карте по облакам точек радара присваивается соответствующее значение скорости. Дальнейшее объединение ячеек различных моментальных карт происходит на уровне накапливаемой карты.

Алгоритмы детекции и трекинга динамических объектов определяют скорость динамических объектов по серии кадров и опосредованно, в то время как радар измеряет скорость напрямую. Поэтому для выделения движущихся в настоящий момент объектов от потенциально динамических (например, остановившихся пешеходов) используются скорости от радара. Ячейки с ненулевой скоростью помечаются динамическими ( $d_{cell} = 1$ ), при этом все ячейки объекта на динамической карте объединяются с помощью алгоритма связанных компонент. Для заполнения накапливаемой карты используется дискретный фильтр Байеса [2], правила обновления отличаются для динамических ячеек (2):

$$\log M_i^{A(t+1)} = \begin{cases} \log \frac{p'_i}{1-p'_i}, & \text{если } d_{cell} = 1, \\ \log M_i^{A(t)} + \log \frac{p'_i}{1-p'_i}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $M_i^{A(t)}$  – значение вероятности  $i$ -ой ячейки после  $t$  измерений, а  $p'_i$  – значение вероятности соответствующей ячейки моментальной карты.

Объединение информации о динамических объектах и статических препятствиях на лидарной и радарной карте в одну общую модель проходимости упрощает процесс планирования траектории. Кроме того добавление отдельных правил обновления накапливаемой карты для динамических препятствий позволяет решить проблему «хвостов» – следов после нахождения в ячейке препятствия. Результат построения накапливаемой карты классическим алгоритмом и предложенной модификацией показан на рис. 2.

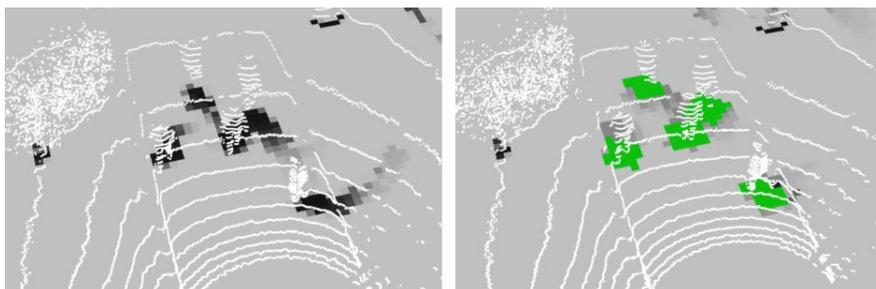


Рис. 13. Накапливаемая карта без комплексирования динамических объектов (слева) и с ним (справа)

**Экспериментальные результаты.** Для тестирования алгоритма в реальных условиях на шасси Clearpath Husky A200 были установлены вычислители, в том числе Jetson AGX Xavier и система технического зрения (см. рис. 3). В её состав входят лидар Ouster OS1-32, радар миллиметрового диапазона на базе чипа Texas Instruments AWR1243, инерциальная спутниковая навигационная система Atlans-C, а также стереопара на базе камер Allied Vision Prosilica.

Взаимная калибровка лидара и камеры проводилась по методике, предложенной в работе [23], лидар и радар в свою очередь калибровались по алгоритму из [24]. Детальный обзор подобных методов также не входит в область интереса этой работы.



Рис. 14. Внешний вид экспериментальной РТП

Быстродействие алгоритма замерялось на платформе Jetson AGX Xavier (запущенной в режиме энергопотребления MAXN) и на десктопном компьютере с процессором Intel i7-10700K и видеокартой RTX 3070 на наборе данных, отснятых на робототехнической платформе суммарной длительностью около тридцати минут.

Среднее время работы всех компонентов алгоритма представлено в табл. 1. При этом построение моментальных карт происходит параллельно, поэтому при расчете суммарного времени используется самое большое время работы этих алгоритмов.

Таблица 1

**Быстродействие компонент алгоритма**

Компонент	i7-10700K и RTX 3070	Jetson AGX Xavier
Мом. карта по лидару, мс	26	32
Мом. карта по радару, мс	19	22
Centerpoint и дин. карта, мс	38	109
Накапливаемая карта, мс	15	18
Суммарное время, мс	53	127

**Выводы.** В статье представлена модификация алгоритма построения карты занятости, комплексирующая информацию о динамических объектах и облака точек от радаров, лидаров или стереокамер. Разработанный алгоритм позволяет учитывать как статичное окружение, так и динамические объекты в общей модели проходимости. В случае использования автомобильного радара как источника облаков алгоритм комплексирующая позволяет учитывать прямые измерения скорости объектов и уточнять данные о потенциально динамических объектах.

Предложенное решение протестировано на реальных данных и работает в реальном масштабе времени, в том числе и на экономичных и дешевых вычислителях, что позволяет использовать его на небольших РТП.

Существует несколько направлений развития предложенного подхода. Для решения задачи выделения динамических препятствий возможно использование семантически размеченных облаков точек как от лидаров так и от стереокамер, что позволит оснащать мобильные РТП только одним датчиком. Также в случае использования плотных облаков от стереокамер критерии определения ячеек-препятствий необходимо усовершенствовать для нахождения ям, крутых уклонов и т.д.

**Благодарность.** Экспериментальные исследования, в том числе оснащение робототехнической платформы и запись наборов данных, проведены совместно с ООО «ИнтеграНТ», г. Москва.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Elfes A.* Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation // Computer. – 1989. – Vol. 22, No. 6. – P. 46-57.
2. *Jaspers H., Himmelsbach M., Wuensche H.J.* Multi-modal local terrain maps from vision and lidar // 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2017. – P. 1119-1125.
3. *Huang J. et al.* An online multi-lidar dynamic occupancy mapping method // 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2019. – P. 517-522.
4. *Xu L. et al.* An occupancy grid mapping enhanced visual SLAM for real-time locating applications in indoor GPS-denied environments // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 104. – P. 230-245.
5. *Wang Y. et al.* A Fusion of Dynamic Occupancy Grid Mapping and Multi-object Tracking Based on Lidar and Camera Sensors // 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). – IEEE, 2020. – P. 107-112.
6. *Eppenberger T. et al.* Leveraging Stereo-Camera Data for Real-Time Dynamic Obstacle Detection and Tracking // arXiv preprint arXiv:2007.10743. – 2020.
7. *Mohajerin N., Rohani M.* Multi-step prediction of occupancy grid maps with recurrent neural networks // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – P. 10600-10608.

8. Schreiber M., Hoermann S., Dietmayer K. Long-term occupancy grid prediction using recurrent neural networks // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2019. – P. 9299-9305.
9. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2012. – P. 3354-3361.
10. Caesar H. et al. Nuscenet: A multimodal dataset for autonomous driving // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – P. 11621-11631.
11. He Y. et al. Know Your Surroundings: Panoramic Multi-Object Tracking by Multimodality Collaboration // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2021. – P. 2969-2980.
12. Wu H. et al. 3D Multi-Object Tracking in Point Clouds Based on Prediction Confidence-Guided Data Association // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021.
13. Belyaev A.A. et al. Object Detection in an Urban Environment Using 77GHz Radar // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2019. – P. 436-439.
14. Wang T. et al. Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications // Sensors. – 2011. – Vol. 11, No. 9. – P. 8992-9008.
15. Meyer M., Kuschik G. Deep learning based 3d object detection for automotive radar and camera // 2019 16th European Radar Conference (EuRAD). – IEEE, 2019. – P. 133-136.
16. Chavez-Garcia R.O., Aycard O. Multiple sensor fusion and classification for moving object detection and tracking // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 17, No. 2. – P. 525-534.
17. Chang S. et al. Spatial Attention fusion for obstacle detection using mmwave radar and vision sensor // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 4. – P. 956.
18. John V., Mita S. RVNet: deep sensor fusion of monocular camera and radar for image-based obstacle detection in challenging environments // Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. – Springer, Cham, 2019. – P. 351-364.
19. Oh S.I., Kang H.B. Fast occupancy grid filtering using grid cell clusters from LIDAR and stereo vision sensor data // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 19. – P. 7258-7266.
20. Yin T., Zhou X., Krähenbühl P. Center-based 3d object detection and tracking // arXiv preprint arXiv:2006.11275. – 2020.
21. Шенель И.О. Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33, № 2.
22. Kelly A., Stentz A. Rough terrain autonomous mobility—part 2: An active vision, predictive control approach // Autonomous Robots. – 1998. – Vol. 5, No 2. – P. 163-198.
23. Абраменко А.А. Калибровка взаимного расположения стереокамеры и трехмерного сканирующего лазерного дальномера // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2.
24. Lee C. L. et al. Extrinsic and temporal calibration of automotive radar and 3D LiDAR // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2020. – P. 9976-9983.

## REFERENCES

1. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, 1989, Vol. 22, No. 6, pp. 46-57.
2. Jaspers H., Himmelsbach M., Wuensche H.J. Multi-modal local terrain maps from vision and lidar, *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2017, pp. 1119-1125.
3. Huang J. et al. An online multi-lidar dynamic occupancy mapping method, *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2019, pp. 517-522.
4. Xu L. et al. An occupancy grid mapping enhanced visual SLAM for real-time locating applications in indoor GPS-denied environments, *Automation in Construction*, 2019, Vol. 104, pp. 230-245.
5. Wang Y. et al. A Fusion of Dynamic Occupancy Grid Mapping and Multi-object Tracking Based on Lidar and Camera Sensors, *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. IEEE, 2020, pp. 107-112.
6. Eppenberger T. et al. Leveraging Stereo-Camera Data for Real-Time Dynamic Obstacle Detection and Tracking, *arXiv preprint arXiv:2007.10743*, 2020.

7. Mohajerin N., Rohani M. Multi-step prediction of occupancy grid maps with recurrent neural networks, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 10600-10608.
8. Schreiber M., Hoermann S., Dietmayer K. Long-term occupancy grid prediction using recurrent neural networks, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 9299-9305.
9. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2012, pp. 3354-3361.
10. Caesar H. et al. Nuscenes: A multimodal dataset for autonomous driving, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020, pp. 11621-11631.
11. He Y. et al. Know Your Surroundings: Panoramic Multi-Object Tracking by Multimodality Collaboration, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021, pp. 2969-2980.
12. Wu H. et al. 3D Multi-Object Tracking in Point Clouds Based on Prediction Confidence-Guided Data Association, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.
13. Belyaev A.A. et al. Object Detection in an Urban Environment Using 77GHz Radar, *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE, 2019, pp. 436-439.
14. Wang T. et al. Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications, *Sensors*, 2011, Vol. 11, No. 9, pp. 8992-9008.
15. Meyer M., Kusch G. Deep learning based 3d object detection for automotive radar and camera, *2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*. IEEE, 2019, pp. 133-136.
16. Chavez-Garcia R.O., Aycard O. Multiple sensor fusion and classification for moving object detection and tracking, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, Vol. 17, No. 2, pp. 525-534.
18. Chang S. et al. Spatial Attention fusion for obstacle detection using mmwave radar and vision sensor, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 4, pp. 956.
19. John V., Mita S. RVNet: deep sensor fusion of monocular camera and radar for image-based obstacle detection in challenging environments, *Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*. Springer, Cham, 2019, pp. 351-364.
20. Oh S.I., Kang H.B. Fast occupancy grid filtering using grid cell clusters from LIDAR and stereo vision sensor data, *IEEE Sensors Journal*, 2016, Vol. 16, No. 19, pp. 7258-7266.
21. Yin T., Zhou X., Krähenbühl P. Center-based 3d object detection and tracking, *arXiv preprint arXiv:2006.11275*, 2020.
22. Shepel' I.O. Modifitsirovannyi algoritm postroeniya karty zanyatosti po oblaku tochek ot neskol'kikh lidarov [A modified algorithm for constructing an employment map based on a point cloud from several lidars], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and Systems], 2020, Vol. 33, No. 2.
23. Kelly A., Stentz A. Rough terrain autonomous mobility—part 2: An active vision, predictive control approach, *Autonomous Robots*, 1998, Vol. 5, No. 2, pp. 163-198.
24. Abramenko A.A. Kalibrovka vzaimnogo raspolozheniya stereokamery i trekhmernogo skaniruyushchego lazernogo dal'nomena [Calibration of the relative position of a stereo camera and a three-dimensional scanning laser rangefinder], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2019, Vol. 43, No. 2.
25. Lee C. L. et al. Extrinsic and temporal calibration of automotive radar and 3D LiDAR, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020, pp. 9976-9983.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Т.А. Суанов.

**Шепель Илья Олегович** – Южный федеральный университет; e-mail: chepsiilya@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79281906038; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; аспирант.

**Shepel Ilya Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: chepsiilya@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79281906038; the department of mathematical support and computer applications; post-graduate.

Хуссейн Ш. Мукер, И.И. Турулин

### АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СИСТЕМЫ MATLAB ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ РЕКУРСИВНЫХ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА

*В ряде приложений цифровой обработки сигналов применяются управляемые цифровые рекурсивные БИХ-фильтры. Под словом «управляемые» имеются в виду фильтры, коэффициенты структуры которых явно зависят от частоты среза или граничных частот. Управляемые БИХ-фильтры могут быть синтезированы с помощью различных средств для расчета традиционных, неуправляемых БИХ-фильтров. В статье был рассмотрен синтез неуправляемых БИХ-фильтров и проанализирована целесообразность представления результатов синтеза для построения управляемых БИХ-фильтров. Были описаны и объяснены методы проектирования на основе MATLAB (2021a) и фундаментальные концепции цифровых фильтров БИХ-Баттерворта. Составной сигнал был обработан анализируемым фильтром, чтобы определить, соответствует ли он критериям прохождения фильтрации. Для проверки рассчитанных фильтров использовался прототип Симулинк, а также инструмент FDA инструментария обработки сигналов. На основании полученных результатов делается вывод о применимости системы MATLAB для синтеза управляемых цифровых рекурсивных БИХ-фильтров Баттерворта. Проанализированная техника была более эффективной, быстрой, уменьшила количество задач и обнаружила, что результаты удовлетворительны.*

*Цифровой БИХ-фильтр; Баттерворт; управляемый; проектирование; синтез; Инструмент FDA; Simulink; Программное обеспечение MATLAB.*

Hussein Sh. Mogheer, I.I. Turulin

### ANALYSIS OF MATLAB SYSTEM APPLICABILITY FOR SYNTHESIS OF CONTROLLED BUTTERWORTH DIGITAL RECURSIVE IIR FILTERS

*A number of digital signal processing applications use controlled IIR digital recursive filters. The word "controlled" refers to filters whose structure ratios clearly depend on the cut rate or boundary frequencies. Controlled IIR filters can be synthesized using a variety of tools to compute traditional, uncontrolled IIR filters. The article dealt with the synthesis uncontrolled IIR filters and analyzed the suitability of the presentation of the results of synthesis for the construction of controlled IIR filters. The design techniques based on MATLAB (2021a) and the fundamental concepts of IIR-Butterworth digital filters were described and explained. The composited signal was processed by the analyzed filter to find whether it met the filtering progress criteria. To check the calculated filters, the Simulink prototype was used, as well as FDA tool of signal processing toolbox. Based on the results obtained, a conclusion was made about the applicability of the MATLAB (2021a) system for the synthesis of controlled digital recursive IIR-Butterworth filters. The analyzed technique was more efficient, faster, decreased the tasks and found the results are satisfying.*

*Digital IIR filter; Butterworth; controlled; design; synthesis; FDA tool; Simulink; MATLAB software.*

**I. Introduction.** Filters are most important and influential elements in the framework of signals and systems, because they are practically presented to filter out the desired signal per the prerequisite to be managed in various areas of interest, varying from speech via image to video and audio processing. i.e., to eliminate or improve particular frequency components in the signal [1]. Tunable digital filters are used in a large number of technical applications. These are, first of all, various adaptive systems: adaptive compression, adaptive sampling, adaptive filters, as well as optimal signal reception against the background of interference, and many others [2]. FIR (Finite Impulse Response) and

IIR (Infinite Impulse Response) filters are the two most common types of digital filters seen in a variety of applications. Signal filtering in the time domain is performed by digital filters. While Spectrum Analyzer is another form of system represent signals in the frequency domain [5, 6].

IIR filter handles specified properties like widths of both passband and stopband, as well as maximum allowable ripples at both passband and stopband [3, 4]. These properties can be used to create a preferred IIR filter design [5]. In comparison to a similar FIR filter, IIR can achieve a specified filtering characteristic with not much memory and computations. For the same filter, IIR needs a lower order than FIR. It is capable of obtaining all of the desired specifications at a low operating complexity. As a result, the IIR filter is the best option for signal filtering [7]. The powerful computational resources of MATLAB allow the realization and simulation testing of digital filters to be completed quickly and efficiently. Simulink, as one of the MATLAB signal processing boxes, has useful features and a user-friendly interface, and the modular design of Simulink and MATLAB allows users to create simulation models and monitor simulation results rather easily and efficiently [8].

**II. The basic concept OF IIR digital filter.** An impulse response of an IIR digital filter contains an infinite amount of non-zero specimens. The existence of feedback, which can produce instability during the operation of the processed filters besides cause them to carry out nonlinear phase features, is the main explanation for their infinite response characteristic. This will initiate oscillations appearing in the response of the IIR filter, resulting in erroneous output that may be difficult to notice and adjust. However, the fundamental advantage of IIR filters is their capacity to complete tasks with less computational power and memory. [9]. The output and input sequences of an IIR filter are defined as the ratio of two polynomials in most cases, is given by the equation (1):

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k). \quad (1)$$

Where:  $x(n)$  and  $y(n)$  are the input signal & output signal of the recursive filter,  $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  are coefficients values of feedback,  $\{b_0, b_1, \dots, b_M\}$  are coefficients values of feed-forward and  $N$  as well as  $M$  are the numbers of both poles and zeros respectively, (usually  $N$  larger than  $M$ ), they are determined the order of the IIR filter.

In essence, the above equation explain that the current output is a weighted sum total of previous inputs and outputs. The transfer function, or difference equation, of a digital filter is its defining feature. The transfer function can be mathematically analyzed to determine how it will respond to any input. As a result, creating specifications suitable to the problem (for example, a second-order low pass filter with a particular cut-off frequency) and then generating a transfer feature that satisfies the requirements is the process of developing a filter [10]. Through a transfer function for a linear, time invariant, the digital filter in the  $z$ -domain can be indicated. Each non-unit coefficient in a recursive system has a causal interpretation, it has a transfer function as in (2):

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_N z^{-N}}. \quad (2)$$

The digital filter is generally performed in nonlinear process by using the  $z$ -transform to change the transfer function into a linear difference equation with a constant coefficient. A block diagram (workable diagram) of the IIR filter specification can be built directly from equation (2) and shown in Figure (1); this is referred to as a direct form realizing.

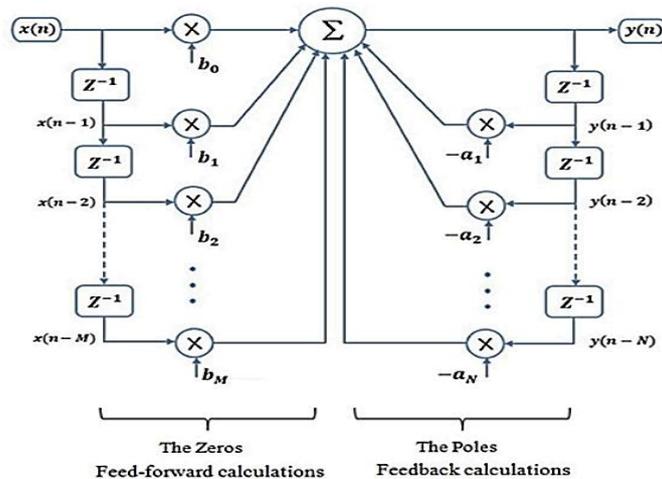


Fig. 1. IIR filter block diagram

**A. Advantages of IIR filter over FIR filter.** Both IIR and FIR filters can be developed using a variety of techniques. As a result, one can wonder which filter, IIR or FIR, is best for a given requirement and which technique should be used to design an acceptable filter. Conversely, some significant distinctions between these two filters are feasible. The IIR filter has several benefits over the FIR filter, which are mentioned below:

1. IIR uses less memory and calculations to attain the required filtering characteristic than a comparable FIR filter.
2. In the stopband of IIR filter it contains a smaller number of side lobes.
3. IIR filters have a lesser or no time delay than FIR filters.
4. IIR needs a lower order than FIR when implementing the same filter.
5. IIR can meet all of the requirements at a low operating complexity.
6. When sharp cutoff filters and fast response are needed, IIR filters produce fewer coefficients than FIR filters.

**B. The basic steps of digital filter design.** There are five steps to designing a digital filter [11]:

- 1) Filter specifications: they are determined based on real needs.
- 2) Coefficient calculation: select one of approximation method and calculate the value of  $a_N$  and  $b_M$ .
- 3) Realization: including a finite accuracy process to convert the transfer function into an appropriate filter form.
- 4) Evaluation of errors: due to the calculation of coefficients and using a finite quantity of bits.
- 5) Implementation: which entails organizing the software and/or hardware.

**C. Butterworth filters.** Have no ripples, gain decreases steadily over the pass and transition bands. The gain gradually declines to  $1-\sqrt{1/2}$  (-3 dB) within the passband. Outside the passband, it diminishes by a factor of  $2N$  per octave ( $N$  20 dB/decade) asymptotically [12]. With increasing  $N$ , the phase response of Butterworth filter develops increasingly nonlinear. The cutoff frequency and the number of poles is the only two mathematical factors that define this filter [13].

Butterworth approximation is a common tool for developing analog filters [14]. The magnitude squared response of low pass Butterworth filter is explained by means of equation (3):

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^{2N}} \quad (3)$$

Where selectivity of filters is provided with (4),

$$F_s = \frac{N}{2\sqrt{2}\omega_c} \quad (4)$$

As well as their attenuation by (5),

$$A = 10 \log(1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^{2N}) \quad (5)$$

In addition, In most cases, the frequency response is maximal flatness in the passband with 0% rolls-off in the stopband [15]. Comparing with Chebyshev type I and/or Elliptic filters, the Butterworth filters have a relatively slow roll-off around the cutoff frequency without ripple, requiring a higher order to achieve a specified stopband requirement as well as a further linear phase response in the passband [16, 17]. As noticed in figure (2), where each of these filters is in the fifth order.

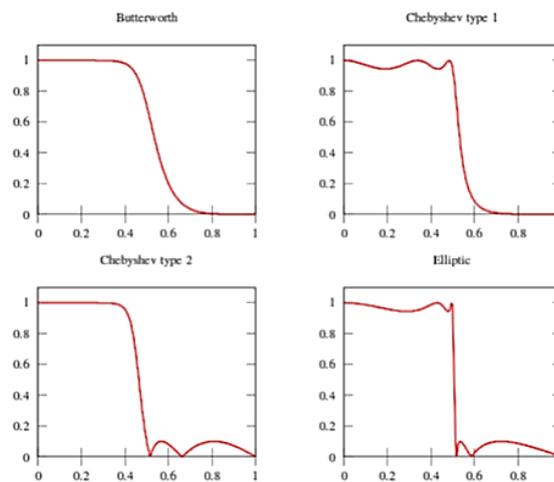


Fig. 2. The phase response of different types of IIR filters

**D. Design method and parameter confirmation.** IIR filters are designed to determine coefficients of the transfer sequence or attenuation characteristic that satisfy specifications. The approximation Butterworth digital filter model is used to implement the design process. A filter is used to eliminate high-frequency components from a signal.

Based on the current Nyquist-Shannon sampling formula, the sampling frequency  $F_s$  ought to be higher than or equal to the twice of the highest frequency in the entire signal frequencies.

Low-pass filter structure requirement was proposed IIR design method, minimum, order select, frequency in units of hertz, where: sampling frequency of 200; stopband and passband frequencies are 40 and 30 respectively. Where stopband attenuation of 20 dB and passband ripple of 1dB. The menu options "Analysis" views the amplitude as well as frequency responses, zero-pole assignment, filter coefficient, and various filter features. After the design is finished, the result will be saved with a .fda extension.

Initially, a Butterworth lowpass filter was chosen to filter the signal to satisfy the operational needs of the input signal. Signal processing toolbox comprises functions to build all of these classic IIR filters in lowpass, high pass, band pass, and band stop setups across both the analog and digital realms (except Bessel, which is only supported in the analog domain) [19].

The filter design abilities programmed directly in MATLAB 2021a by the use of the Filter Design and Analysis Tool (FDAT). It has several powerful features can be listed as following:

1. It is a user interface for modeling, quantifying, and evaluating filters.
2. It had a very straightforward and adaptable process.
3. It includes methods for considering the behavior and characteristics of filters, such as phase and magnitude responses and pole-zero plot.

4. Additional features from other MathWorks products are universally integrated [18].

5. It can export filters as single input or output block to a Simulink window [19].

**E. Interface design based on FDA tool.** Utilizing MATLAB, the way of organizing a filter is fairly self-helpful [20]. FDAT method was used to design IIR filter. After typing `fdatool` or `filterDesigner` in the command window and command is run, the graphical user interface (GUI) would open in the default design mode [21].

The designer needs to select design method of IIR filter (Butterworth, Chebyshev Types I and II, elliptic or other), response type and other essential performing index. Also, toward decide value of frequency and magnitude specifications. When all requirements are satisfied, select the design filter [22]. as shown in figure (3).

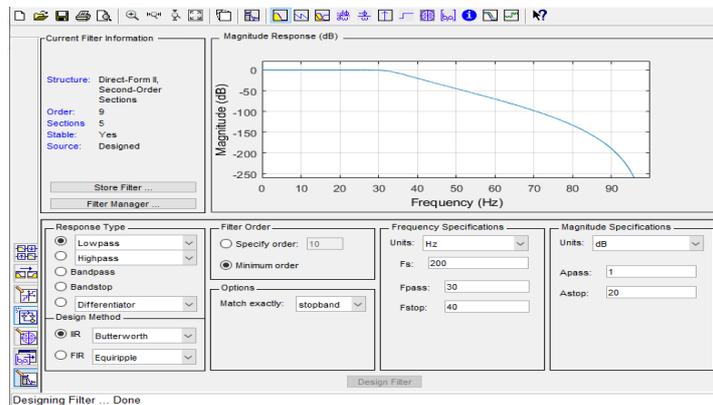


Fig. 3. Filter design and analysis tool

Also, the MATLAB method for IIR filter design is a two-command process; first, to determine the order and critical frequencies, second to compute the filter coefficients. For a Butterworth filter are achieved in following code to ensure that it met the requirements.

The program executed with "evaluation selection" instruction or F9 in the MATLAB 2021a command window. And all variables' values of the designed filter were listed in Workspace window.

```

fs = 200;
Wp=2*30/fs;
Ws=2*40/fs;
Apass = 1;
Astop = 40;
[N,Wn]=buttord(Wp,Ws,1,20);
[B,A]=butter(N,Wn);
fvtool(B,A)

```

The necessary parameters, including the passband frequency, the stopband frequency, and the passband and stopband ripples, are chosen in such systems to obtain the best possible results in the magnitude response, phase response, impulse response, pole-zero plotting, and coefficient determination.

The stability of the realized structure is demonstrated by the pole-zero plotting, which forces the poles of a stable IIR filter within the unit circle. On the other hand, the instability of the filter in the case of errors during filtering is due to the fact that the recursive filters are based on unstable links - integrators. Therefore, it is sometimes said that the integrator is on the verge of stability [23]. From figure.4 to figure.6, the performance graphs were shown.

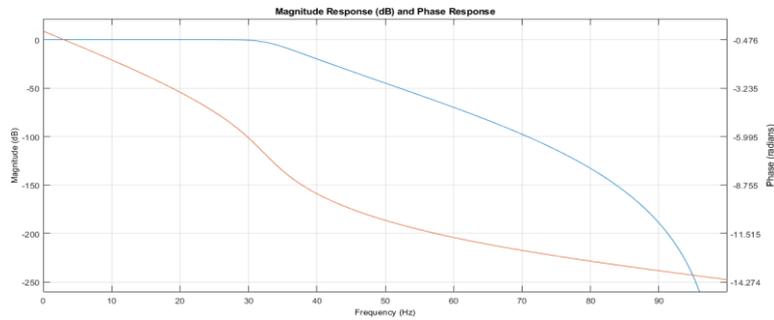


Fig. 4. Butterworth filter lowpass filter Magnitude and phase responses

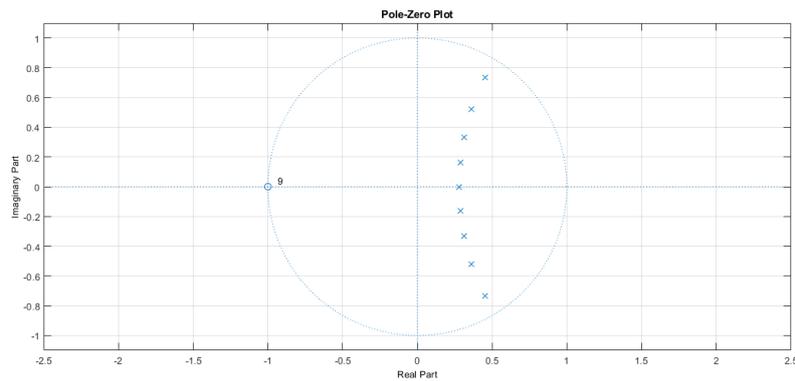


Fig. 5. Butterworth filter low pass filter pole-zero plot

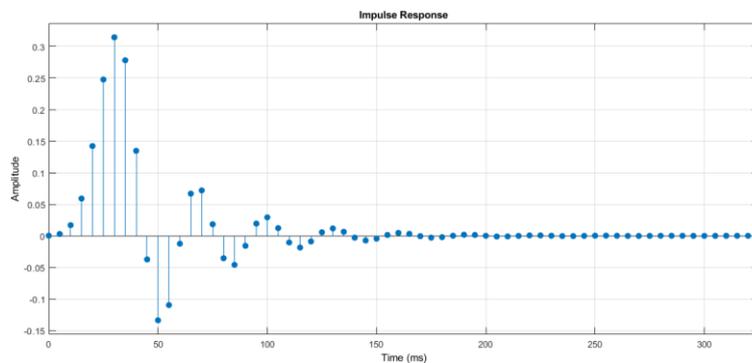


Fig. 6/ Butterworth filter low pass filter Impulse response

**III. Simulation based on simulink model.** Simulink is another significant MATLAB toolbox, with the primary goal of pattern identification, emulation, and evaluation. Which may include pre-simulation and review of the device before it was built. The Simulink library browser dialog box was opened after Simulink syntax was typed in the command screen.

In the Simulink environment, the paper low pass digital filter “Butterworth” is the output of exporting it as of GUI to Simulink. Also, three block parameters: sine wave, vector scope in addition to add part of sum process library scope, which can be saved as new simulation file (.slx). Without having to compile code, a prototype of a system block illustration can be quickly created [24]. As shown in figure .7, each element was linked on the way to form a Simulink block diagram of the filtering process.

We constructed following: a group of signals units were set with frequency value (in hertz also) the same as: 20, 45 and 60 sinusoidal signals, specifications for the digital filter interface element as:  $F_s=200$ ;  $f_{pass}=30$ ;  $f_{stop}=40$ , besides sample time set =  $1/200$ . Add module with specify character vector containing +++ for each input port. The time domain waveforms of the filtering effect were produced when the completed simulation block in figure .7, was performed with the run choice.

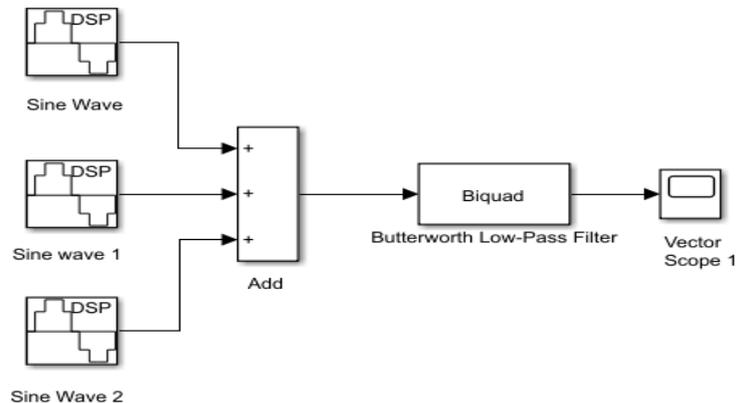
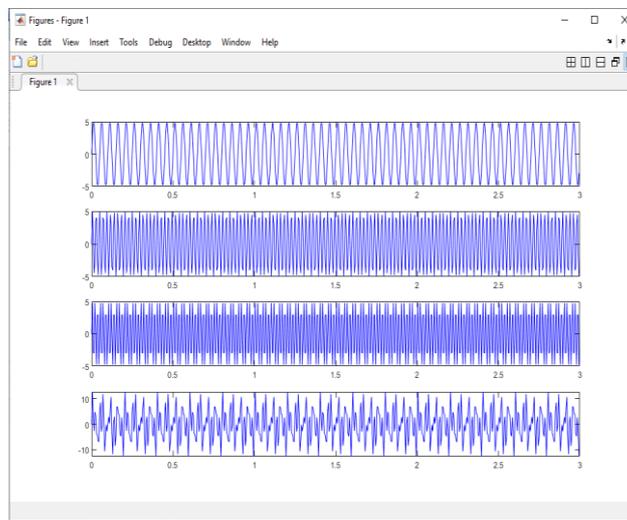


Fig. 7. Simulink block diagram

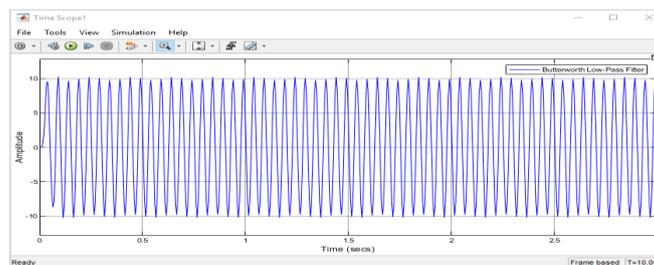
The input signal was comprised with 3 types of frequency components in the time domain waveform and simulated with subsequent MATLAB instructions as shown in figure.8 (a and b) [25][26]. After filtering, the two higher frequencies were damped. Whereas  $f_1$  frequency sine wave signals pass through the low pass IIR filter,  $f_2$  and  $f_3$  frequency sine wave signals are greatly suppressed. Before filtering, the waveform of input signal ( $x_k$ ) was disoriented, but it was ordered after filtering realization [8]. The simulation results demonstrate that, the different evaluation indexes of the IIR filter design fulfilled the required specifications, and the design process was intuitive and straightforward.

```
f1=20; f2=45; f3=60;
Fs=200;
Ts=1/Fs;
t=0:Ts:2-Ts;
Xk1=5*sin(2*pi*f1*t);
Xk2=5*sin(2*pi*f2*t);
```

```
Xk3=5*sin(2*pi*f3*t);
Xkn= Xk1+ Xk2+ Xk3;
subplot(4,1,1);
plot(t,Xk1,'b');
subplot(4,1,2);
plot(t,Xk2,'b');
subplot(4,1,3);
plot(t,Xk3,'b');
subplot(4,1,4);
plot(t,Xkn,'b');
```



*a – Original discrete three input signals and add signal waveforms*



*b –The discrete wave after filterig. (vector scope 1)*

*Fig. 8. Time domain waveforms of the utilized signal before (a) and after (b) filtering*

**Conclusion.** The IIR Butterworth filter was successfully analyzed and implemented with the MAT LAB (2021a) environment and the Simulink model of a filter. To design controlled filters, the system (transfer) function of an ordinary (uncontrolled) filter is required, which is presented as a cascading connection of second-order links. If the filter order as a whole was odd, then plus one more link of the first order. The digital filter was easily and simply simulated, reducing both the programming complexity and

the amount of work required. In practice, it was very reliable. Concurrently, using MATLAB tools, filter analysis can be done easily to meet requirements and model whole systems more accurately. The comparison of the results of filter synthesis with the method of designing controlled digital filters [2] allows us to conclude that, the MATLAB system is applicable for designing digital controlled IIR Butterworth filters.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chakraborty S., Maitra S.* Design and Determination of Optimum Coefficients of IIR Digital Highpass Filter using Analog to Digital Mapping Technique // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 58, No. 7. – P. 19-26.
2. *Турулин И. и др.* Управляемые цифровые фильтры. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 306 с.
3. *Babu P.R.* Digital Signal Processing. – Scitech Publication (India) Pvt/Ltd, Chennai, 2008.
4. *Kaur R., Patterh M.S., Dhillon J.S.* Design of optimal L1 stable IIR digital filter using hybrid optimization algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 38, No. 2. – P. 27-32.
5. *Chauhan R.S., Arya S.K.* Design of IIR digital filter using analog to digital mapping // Journal of Neural Computing Systems. – 2010. – Vol. 3, No. 01. – P. 51-55.
6. *Chakraborty S., Maitra S.* Design and Determination of Optimum Coefficients of IIR Digital Highpass Filter using Analog to Digital Mapping Technique // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 58, No. 7. – P. 19-26.
7. *Singh T., Jain A., Chourasia B.* Study and performance analysis of IIR Filter for noise diminution in digital signal using MATLAB // Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput. – 2017. – Vol. 6, No. 4. – P. 2020.
8. *Gao Y., Zhang L.L.* Simulation study of fir filter based on matlab // 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). – IEEE, 2010. – P. 1-4.
9. *Oshana R.* DSP software development techniques for embedded and real-time systems. – Elsevier, 2006.
10. *Hussain Z.M., Sadik A.Z., O'Shea P.* Digital signal processing: an introduction with MATLAB and applications. – Springer Science & Business Media, 2011.
11. *Ifeachor E.C., Jervis B.W.* Digital signal processing: a practical approach. – Pearson Education, 2002.
12. *Lyons R.G.* Understanding digital signal processing, 3/E. – Pearson Education India, 2004.
13. *Podder P. et al.* Design and implementation of Butterworth, Chebyshev-I and elliptic filter for speech signal analysis // arXiv preprint arXiv:2002.03130. – 2020.
14. *Bavafa-Toosi Y.* Introduction to linear control systems. – Academic Press, 2017.
15. *Babu P.R.* Digital Signal Processing. Scitech Publication (India) Pvt //Ltd, Chennai. – 2008.
16. *Tsao Y.C., Choi K.* Hardware-efficient VLSI implementation for 3-parallel linear-phase FIR digital filter of odd length // 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2012. – P. 998-1001.
17. *Proakis J.G.* Digital signal processing: principles algorithms and applications. – Pearson Education India, 2001.
18. *Perutka K. (ed.).* MATLAB for Engineers: Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics. – BoD–Books on Demand, 2011.
19. *Siauw T., Bayen A.* An introduction to MATLAB® programming and numerical methods for engineers. – Academic Press, 2014.
20. *Singh A., Srinivasan S.* Digital signal processing implementations: using DSP microprocessors with examples from TMS320C54xx. – CI-Engineering, 2004.
21. *Welch T.B., Wright C.H.G., Morrow M.G.* Real-time digital signal processing from MATLAB to C with the TMS320C6x DSPs. – CRC Press, 2016.
22. *Singh Y., Tripathi S., Pandey M.* Analysis of digital IIR filter with LabVIEW // International Journal of Computer Applications. – 2010. – Vol. 10, No. 6. – P. 23-30.
23. *Турулин И.И.* Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой. – 1999.

24. *Semmlow J.* Circuits, signals, and systems for bioengineers // Parasitic Element (Electrical networks). – 2005. – P. 134-135.
25. *Giron-Sierra J.M.* Digital signal processing with matlab examples. Vol. 1: Signals and data, filtering, non-stationary signals, modulation. – Springer, 2016.
26. *Chaparro L., Akan A.* Signals and Systems using MATLAB. – Academic Press, 2018.

#### REFERENCES

1. *Chakraborty S., Maitra S.* Design and Determination of Optimum Coefficients of IIR Digital Highpass Filter using Analog to Digital Mapping Technique, *International Journal of Computer Applications*, 2012, Vol. 58, No. 7, pp. 19-26.
2. *Turulin I. i dr.* Upravlyaemye tsifrovye fil'try [Controlled digital filters]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 306 p.
3. *Babu P.R.* Digital Signal Processing. Scitech Publication (India) Pvt/Ltd, Chennai, 2008.
4. *Kaur R., Patterh M.S., Dhillon J.S.* Design of optimal L1 stable IIR digital filter using hybrid optimization algorithm, *International Journal of Computer Applications*, 2012, Vol. 38, No. 2, pp. 27-32.
5. *Chauhan R.S., Arya S.K.* Design of IIR digital filter using analog to digital mapping, *Journal of Neural Computing Systems*, 2010, Vol. 3, No. 01, pp. 51-55.
6. *Chakraborty S., Maitra S.* Design and Determination of Optimum Coefficients of IIR Digital Highpass Filter using Analog to Digital Mapping Technique, *International Journal of Computer Applications*, 2012, Vol. 58, No. 7, pp. 19-26.
7. *Singh T., Jain A., Chourasia B.* Study and performance analysis of IIR Filter for noise diminution in digital signal using MATLAB, *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, 2017, Vol. 6, No. 4, pp. 2020.
8. *Gao Y., Zhang L.L.* Simulation study of fir filter based on matlab, *2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. IEEE, 2010, pp. 1-4.
9. *Oshana R.* DSP software development techniques for embedded and real-time systems. Elsevier, 2006.
10. *Hussain Z.M., Sadik A.Z., O'Shea P.* Digital signal processing: an introduction with MATLAB and applications. Springer Science & Business Media, 2011.
11. *Ifeachor E.C., Jervis B.W.* Digital signal processing: a practical approach. Pearson Education, 2002.
12. *Lyons R.G.* Understanding digital signal processing, 3/E. Pearson Education India, 2004.
13. *Podder P. et al.* Design and implementation of Butterworth, Chebyshev-I and elliptic filter for speech signal analysis // arXiv preprint arXiv:2002.03130, 2020.
14. *Bavafa-Toosi Y.* Introduction to linear control systems. Academic Press, 2017.
15. *Babu P.R.* Digital Signal Processing. Scitech Publication (India) Pvt //Ltd, Chennai, 2008.
16. *Tsao Y.C., Choi K.* Hardware-efficient VLSI implementation for 3-parallel linear-phase FIR digital filter of odd length, *2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 2012, pp. 998-1001.
17. *Proakis J.G.* Digital signal processing: principles algorithms and applications. Pearson Education India, 2001.
18. *Perutka K.* (ed.). MATLAB for Engineers: Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics. – BoD–Books on Demand, 2011.
19. *Siauw T., Bayen A.* An introduction to MATLAB® programming and numerical methods for engineers. Academic Press, 2014.
20. *Singh A., Srinivasan S.* Digital signal processing implementations: using DSP microprocessors with examples from TMS320C54xx. CI-Engineering, 2004.
21. *Welch T.B., Wright C.H.G., Morrow M.G.* Real-time digital signal processing from MATLAB to C with the TMS320C6x DSPs. CRC Press, 2016.
22. *Singh Y., Tripathi S., Pandey M.* Analysis of digital IIR filter with LabVIEW, *International Journal of Computer Applications*, 2010, Vol. 10, No. 6, pp. 23-30.
23. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystvuyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with a finite impulse response], 1999.

24. Semmlow J. Circuits, signals, and systems for bioengineers, *Parasitic Element (Electrical networks)*, 2005, pp. 134-135.
25. Giron-Sierra J.M. Digital signal processing with matlab examples. Vol. 1: Signals and data, filtering, non-stationary signals, modulation. Springer, 2016.
26. Chaparro L., Akan A. Signals and Systems using MATLAB. Academic Press, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Хуссейн Ш. Мукер** – Южный федеральный университет; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: +79612936340; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Турулин Игорь Ильич** – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +79618170609; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

**Hussein Sh. Mogheer** – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79612936340; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

**Turulin Igor Ilich** – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +79618170609; the department of theoretical foundations of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.397.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-82-91

**К.О. Север, И.И. Турулин, Д.А. Гужва**

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СПОСОБОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ШУМА В ИЗОБРАЖЕНИИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАШУМЛЕННОСТИ**

*В современной технике фото- и видеосъемки любое изображение в процессе его формирования искажается под действием различных видов шумов. Существуют различные виды шумов, но на практике наиболее часто встречаются модели импульсного и гауссовского шума. Ослабление действия шумов достигается путём фильтрации. На данный момент не существует универсального фильтра, подавляющего данные типы шумов при различных интенсивностях искажения. Поэтому важным аспектом является определение области применения каждого вида фильтра при подавлении шумов в изображении и создании типа фильтра, состоящего из синтеза сочетающего различные методы фильтрации для оптимальной очистки изображения. В статье представлен сравнительный анализ медианной фильтрации и фильтрации Винера для устранения импульсного и гауссовского шума в изображении при разной степени зашумленности. Для моделирования использовалось одно изображение, искаженное отдельно импульсным и отдельно гауссовским шумом с вероятностями искажения пикселей от 1 % до 99 % включительно. Фильтрация производилась с окнами, равными 3x3 и 5x5. В результате были получены численные оценки качества фильтрации изображений на основе пикового отношения сигнал-шум (PSNR). На основе полученных данных была проанализирована область применения исследуемых фильтров, их модификации, достоинства и недостатки, а также приведены рекомендации по их использованию. В результате сравнительного анализа исследуемых видов фильтрации для зашумленных изображений было установлено, что медианный фильтр с окном 3x3 лучше справляется с очисткой изображения от импульсного шума малой интенсивности и с окном 5x5 – с очисткой изображения средней интенсивности зашумления. Также медианный фильтр лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при его средних и высоких значениях среднеквадратичного отклонения. Фильтр Винера с окнами 3x3 и 5x5 лучше фильтрует гауссовский шум при малых его значениях его среднеквадратичного отклонения. Также фильтр Винера лучше справляется с импульсным шумом относительно высокой интенсивности зашумления.*

*Обработка изображений; импульсный шум; гауссовский шум; фильтры; медианный фильтр; фильтр Винера.*

K.O. Sever, I.I. Turulin, D.A. Guzhva

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO FILTERING METHODS  
TO ELIMINATE NOISE IN AN IMAGE OF DIFFERENT DEGREES OF NOISE**

*In modern photography and video technology, any image in the process of its creation is distorted by various types of noise. There are various types of noise, but in practice, impulsive and Gaussian noise models are the most common. Attenuation of the effect of noise is achieved by filtering. At the moment, there is no universal filter that suppresses noise data at various intensities of distortion. Therefore, an important aspect is to determine the field of application of each type of filter when suppressing noise in the image and creating a filter, consisting of a combination of different filtering methods for optimal image cleaning. The article presents a comparative analysis of median filtering and Wiener filtering to eliminate impulse and Gaussian noise in the image with different degrees of noise. For modeling, we used one image, separately distorted by impulse and separately by Gaussian noise with pixel distortion probabilities from 1% to 99% inclusive. Filtration was performed with windows equal to 3x3 and 5x5. As a result, we obtained numerical estimates of the image filtering quality based on the peak signal-to-noise ratio (PSNR). On the basis of the data obtained, the application of the investigated filters, their modifications, advantages and disadvantages were analyzed, as well as recommendations for their use were given. As a result of a comparative analysis of the studied types of filtering for noisy images, it was found that the median filter with a 3x3 window copes better with image cleaning from low-intensity impulse noise and with a 5x5 window - with image cleaning with an average noise intensity. Also, the median filter does a better job of filtering out Gaussian noise at its medium and high rms deviations. The Wiener filter with 3x3 and 5x5 windows better filters Gaussian noise at small values of its root-mean-square deviation. Also, the Wiener filter copes better with impulse noise with relatively high noise power.*

*Image processing; impulse noise; Gaussian noise; filters; median filter; Wiener filter.*

**Введение.** В процессе формирования и приема-передачи цифровые изображения подвергаются влиянию различных шумов, что приводит к ухудшению визуального качества и потере участков изображений. Одной из основных задач цифровой обработки изображений является восстановление поврежденных пикселей (реставрация изображения по заданному критерию) [1].

При формировании изображений и до оцифровки шумы накладываются на аналоговый сигнал. Источники шума разделяют на:

1. Внутренние (неидеальность используемого оборудования) – цифровые шумы, вносимые оптоэлектронными системами цифрового фотоаппарата (здесь и далее под термином «цифровой фотоаппарат» имеются в виду любые устройства оцифровки изображений).

2. Внешние (плохие условия съемки) – шумы, возникающие при ночной фото-, видеосъемке, неравномерности освещенности предмета [2, 11].

Оптическая система цифрового фотоаппарата вносит искажения в изображение в виде аберраций [12], а светочувствительные приемники (например, ПЗС-матрицы) – электронный шум [13].

Существуют различные виды шумов: импульсный, аддитивный гауссовский, мультипликативный, шум квантования, спекл-шум и другие [3, 11]. Но на практике наиболее распространенными являются модели импульсного и аддитивного гауссовского шума.

Отличительной чертой аддитивного гауссовского шума является добавление значений из соответствующего нормального распределения с нулевым средним значением к каждому пикселю изображения. Данный тип шума обычно возникает во время формирования цифрового изображения (например, шум сенсоров из-за высокой температуры и/или недостатка освещения).

Импульсный шум заменяет части пикселей на изображении значениями случайной или фиксированной величины. При визуальной оценке изображения импульсный шум проявляется в виде хаотично разбросанных черных и белых точек. Поэтому его часто называют точечным шумом или шумом «соль и перец» [14]. Данный вид шума связан с ошибками, возникающими при передаче и ошибочном декодировании изображений [4].

На данный момент существует множество методов очистки изображений от шума, которые зависят от типа шумового воздействия [5]. Алгоритмы шумоподавления обычно предназначены для подавления определенного типа шума. Универсальных фильтров, определяющих и подавляющих все типы шумов, пока не существует. Однако большинство шумов можно обобщить моделью белого гауссовского шума, поэтому большинство алгоритмов ориентируется на подавление данного вида шума. Наиболее популярными методами удаления шумов являются сглаживающие фильтры, фильтры Винера, медианные фильтры и ранжирующие фильтры [6].

Для меняющейся помехосигнальной обстановки могут быть применены управляемые цифровые фильтры [8], а для снижения вычислительной сложности – рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой (РКИХ) [9]. РКИХ-фильтр обеспечивает минимальные искажения изображений, так как может иметь линейную фазовую характеристику (в случае симметрии КИХ). В [10] предлагаются фильтры, сочетающие достоинства фильтров [9, 10] для несложных импульсных характеристик, например, двумерных окон, подходящих для сглаживания изображений. Однако в данной работе проведен только сравнительный анализ медианной фильтрации и фильтрации Винера для устранения импульсного и гауссовского шума при различной интенсивности искажения статического изображения.

**Цель работы** – определение области применения медианного фильтра и фильтра Винера при очистке изображений, искаженных импульсным и гауссовским шумом разной степени зашумленности.

**Постановка задачи.** Пусть имеется исходное изображение в оттенках серого. Требуется смоделировать импульсный и гауссовский шумы с настраиваемым параметром интенсивности искажения, накладываемым на исходное изображение. Также необходимо смоделировать медианный фильтр и фильтр Винера для очистки зашумленных изображений. Для оценки качества фильтрации произвести вычисление характеристики PSNR (пиковое отношение сигнал-шум) для каждого зашумленного изображения.

**Результаты моделирования.** Для моделирования функций зашумления и последующей фильтрации использовалось изображение «Ноутбук», представленное на рис. 1,а.

Исходное изображение отдельно искажалось импульсным шумом (рис. 1,б) при помощи функции «addnoise» [7] программного пакета Mathcad 15.0 со следующими параметрами:

- ◆  $p = (0,05 \dots 0,99)$  – значение вероятности добавления шума на используемое изображение;
- ◆  $n = 150$  – значение интенсивности пикселя, добавляемого (или высчитываемого) в зашумленный пиксель.

Также исходное изображение отдельно искажалось гауссовским шумом (рис. 1, в). Для создания гауссовского шума использовалось следующее выражение (см. формулу 1):

$$\text{gnoise}(Q_{\text{avg}}, \sigma) = Q_{\text{avg}} + \sigma \sqrt{-2 \ln(\text{rnd}(1)) * \cos(2 * \pi * \text{rnd}(1))}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{avg}}$  – среднее значение шума,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $\text{rnd}(x)$  – функция возврата равномерно распределенного случайного числа между 0 и  $x$ .

Используя функцию `gnoise`, были построены матрицы шумов с параметрами  $Q_{avg} = 0$ ,  $\sigma = (1 \dots 99)$  и добавлена на исходное изображение.

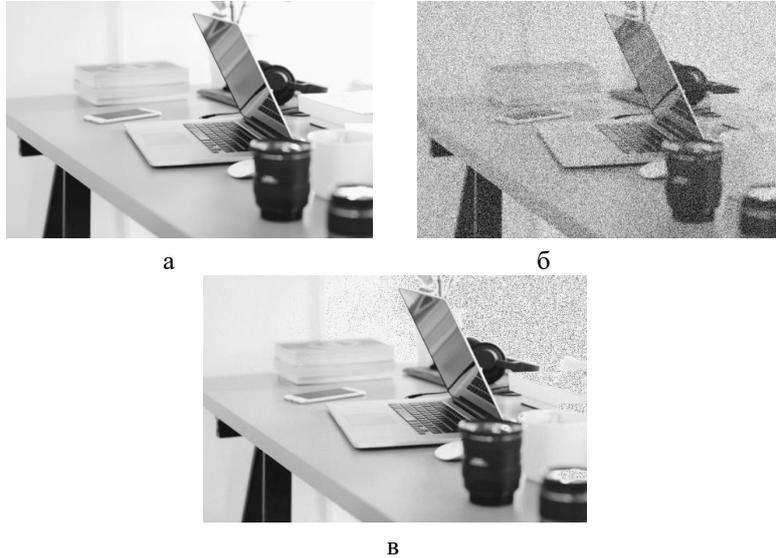
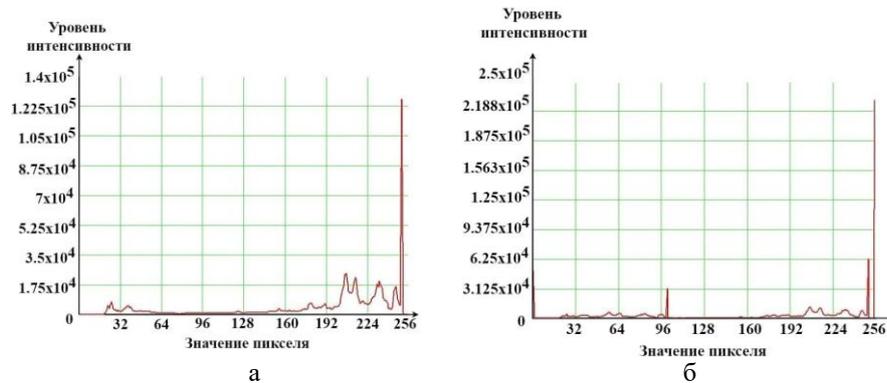


Рис. 1. Изображение: а – исходное; б – искаженное импульсным шумом с интенсивностью  $p=0.5$ ; в – искаженное гауссовским шумом с параметрами  $Q_{avg} = 0$ ,  $\sigma = 5$

Для наглядного отображения влияния шумов на исходное изображение на рис. 2 представлены гистограммы исходного и зашумленных изображений. На гистограмме изображения зашумленного импульсным шумом (см. рис. 2,б) отчетливо видно, как в разы увеличивается интенсивность пикселей, соответствующих черному (значение пикселя равно 0) и белому (значение пикселя равно 255) цвету. При зашумлении изображения гауссовским шумом (см. рис. 2,в) с параметрами  $Q_{avg} = 0$ ,  $\sigma = 5$  наблюдается нормальное распределение шума и искажение пикселей только белого цвета. При увеличении среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  зашумлению подвергаются пиксели темных оттенков.

Очистка зашумленных изображений (см. рис. 1,б,в) производилась медианным фильтром с однородной матрицей фильтрующего ядра и с окнами  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  при помощи функции «`quanfilt`», и фильтром Винера с окнами  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  при помощи функции «`wiener2d`». На рис. 3, 4 показаны результаты обработки изображений.



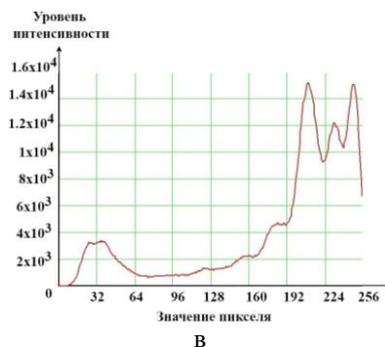


Рис. 2. Гистограмма изображения: а – исходного; б – искаженного импульсным шумом с интенсивностью  $p=0.5$ ; в – искаженного гауссовским шумом с параметрами  $Q_{avg} = 0, \sigma = 5$

Для оценки качества фильтрации изображения от шума использовалась характеристика PSNR (пиковое отношение сигнал-шум), вычисляемая по формулам 2-3:

$$PSNR = 10 \log \left( \frac{N^2}{MSE} \right), \quad (2)$$

$$MSE = \frac{\sum_i \sum_j (y_{i,j} - x_{i,j})^2}{H_1 * H_2}, \quad (3)$$

где MSE – среднеквадратическая ошибка восстановленного изображения; N – максимальная величина пикселя изображения, в данном случае равняется 255;  $y_{i,j}$  – восстановленное изображение;  $x_{i,j}$  – исходное изображение;  $H_1$  и  $H_2$  – ширина и высота изображения.

Значения PSNR для каждого метода фильтрации по устранению импульсного и гауссовского шума при различных степенях зашумления представлены в табл. 1, 2.

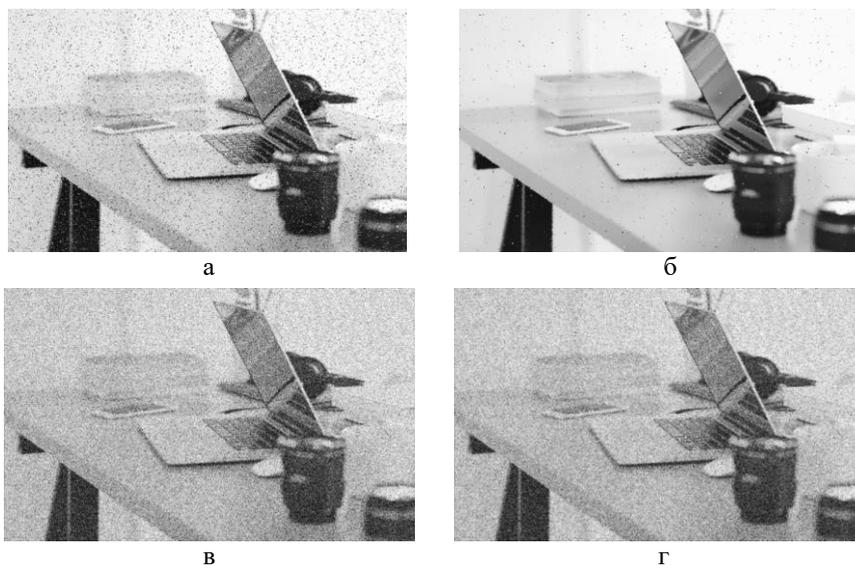


Рис. 3. Очищенное изображение от импульсного шума с интенсивностью  $p=0.5$  после: а – медианной фильтрации с окном  $3 \times 3$ ; б – медианной фильтрации с окном  $5 \times 5$ ; в – фильтрации Винера с окном  $3 \times 3$ ; г – фильтрации Винера с окном  $5 \times 5$

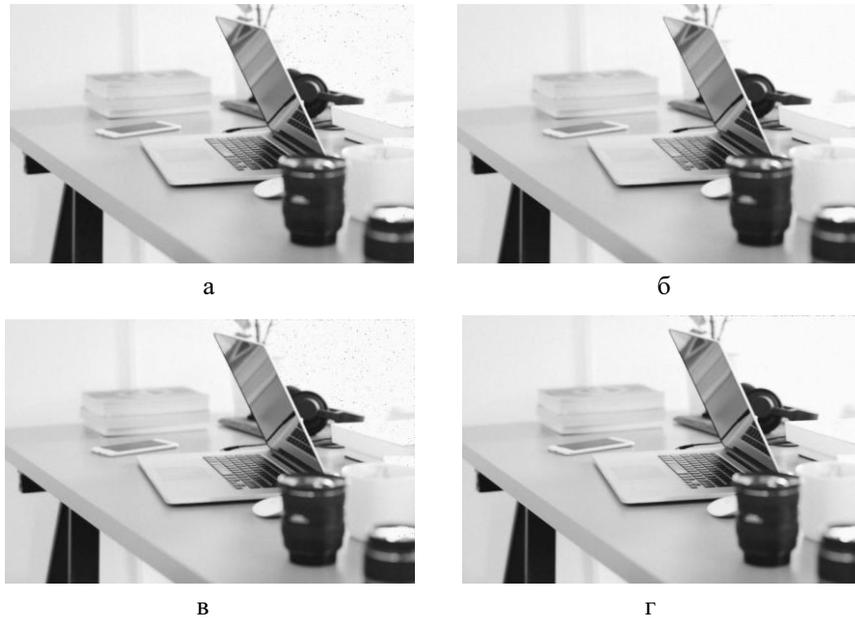


Рис. 4. Очищенное изображение от гауссовского шума с параметрами  $Q_{avg} = 0$ ,  $\sigma = 5$  после: а – медианной фильтрации с окном  $3 \times 3$ ; б – медианной фильтрации с окном  $5 \times 5$ ; в – фильтрации Винера с окном  $3 \times 3$ ; г – фильтрации Винера с окном  $5 \times 5$

Таблица 1

Значение PSNR для каждого метода фильтрации при различных степенях зашумления ( $p$ ) импульсным шумом

Используемые методы	$p$						
	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9	0,99
Исходное зашумленное изображение	20,15	17,16	13,19	10,17	8,41	7,62	7,2
Медианная фильтрация с окном $3 \times 3$	43,02	40,61	29,5	17,25	10,86	8,46	7,33
Медианная фильтрация с окном $5 \times 5$	37,84	37,44	35,66	27,4	14,24	9,45	7,45
Фильтрация Винера с окном $3 \times 3$	21,92	19,7	16,59	13,66	11,64	10,65	10,09
Фильтрация Винера с окном $5 \times 5$	23,69	21,3	17,63	14,30	12,1	11,05	10,45

Согласно результатам, которые представлены в табл. 1, медианная фильтрация с окном  $3 \times 3$  лучше справляется со слабой степенью зашумления изображения ( $p=0.05 \dots 0.1$ ), так как приводит к меньшему искажению (размытию) очертаний объектов на изображении. Для подавления шумов средней интенсивности ( $p=0.25 \dots 0.75$ ) необходимо использовать медианный фильтр с большим размером окна фильтрации ( $5 \times 5$ ), так как при увеличении размера окна растёт способность

фильтра подавлять шумовую компоненту. Однако малые по размеру объекты на изображении могут быть целиком удалены при больших размерах окна фильтрации. При искажениях высокой интенсивности ( $p=0.9...0.99$ ) линейный фильтр (фильтр Винера) лучше справляется с зашумленным сигналом, чем медианный, так как его алгоритм предназначен для минимизации квадратичной ошибки между исходным и восстановленным изображением.

Основным недостатком медианной фильтрации является размытие изображения, что становится особенно заметным при обработке изображений, искаженных импульсным шумом с высокой интенсивностью. Для уменьшения данного негативного эффекта были предложены следующие способы медианной фильтрации:

- ◆ использование крестообразной формы ядра фильтра. Данный способ прост в реализации, быстр и позволяет сохранить больше прямых кромок, линий и углов в изображении, но хуже осуществляет фильтрацию зашумленного сигнала, чем фильтр с однородным ядром [15];

- ◆ использование адаптивного медианного фильтра. Данный тип фильтрации предварительно определяет наличие импульсного искажения пикселя [16, 17], а затем осуществляет его фильтрацию. Также в основе данного типа фильтра лежит синтез различных методов фильтрации. Например, в работе [18] предложен метод совместного использования медианных и усредняющих фильтров, в основе которого лежит концепция увеличения размера маски фильтра до тех пор, пока не будет получено приемлемое значение. Также данный метод был использован в работе [19] для обработки цветных изображений. Другой метод [20] предлагает использовать окна различного размера, которые будут применяться на основе предварительного анализа обрабатываемого изображения. Все вышеперечисленные методы позволяют весьма эффективно справляться с импульсным шумом, не размывая и не смещая края крупных объектов на изображении, но сложны в реализации и требуют больших вычислительных затрат.

Интересным направлением дальнейших исследований является применение РКИХ-фильтров [9] в адаптивной медианной фильтрации для уменьшения вычислительных затрат при фильтрации изображения.

Таблица 2

**Значение PSNR для каждого метода фильтрации при различных степенях зашумления ( $\sigma$ ) гауссовским шумом**

Используемые методы	$\sigma$						
	1	5	25	50	75	90	99
Исходное зашумленное изображение	48,13	34,15	20,18	14,16	10,64	9,05	8,22
Медианная фильтрация с окном 3x3	44,59	39,74	27,76	21,87	18,41	16,8	16
Медианная фильтрация с окном 5x5	38,14	37,28	30,9	25,78	22,51	20,97	20,17
Фильтрация Винера с окном 3x3	50,71	40,87	24,66	18,49	14,95	13,35	12,53
Фильтрация Винера с окном 5x5	47,77	42,3	25,86	19,51	15,95	14,35	13,52

Согласно результатам, которые представлены в табл. 2, фильтр Винера лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при малых его значениях среднеквадратичного отклонения ( $\sigma = 1...5$ ). Однако применение фильтра Винера приво-

дит к более сильному размытию участков изображения (к потере деталей и контуров изображения), чем медианного фильтра, так как его применение связано с предположением о стационарности изображения. А поскольку наличие краев изображения служит нарушением стационарности, винеровская фильтрация не является строго оптимальной [21].

Одной из особенностей фильтра Винера при реализации фильтрации изображений является возникновение неопределенной ситуации, когда центр окна близок к границе изображения, и несколько элементов маски находятся вне изображения. Данный эффект можно наблюдать у правого верхнего угла на рисунке 4,б, где полоса зашумленных пикселей остается не отфильтрованной. Существует три способа, позволяющих учитывать это обстоятельство:

- 1) ограничение перемещения центра окна по изображению (т. е. установления рамок, за которые запрещено выходить окну фильтра);
- 2) расширение изображения путем добавления строк и столбцов с нулевыми значениями;
- 3) расширение изображения, повторяя строки и столбцы изображения симметрично границе.

После фильтрации добавленные строки и столбцы удаляются, а обработанное изображение возвращается с исходным размером. Однако следует учитывать, что значения пикселей, использованных для расширения изображения, оказывают влияние на результат фильтрации пикселя внутри граничной полосы, ширина которой зависит от размеров окрестности, используемой при фильтрации. Например, если маска фильтра имеет размеры  $5 \times 5$  пикселей, то с каждой стороны добавляются по две строки и столбца.

**Заключение.** В результате применения исследуемых видов фильтраций над зашумленными изображениями установлено, что медианный фильтр с окном  $3 \times 3$  лучше справляется с очисткой изображения от импульсного шума малой интенсивности ( $p=0.05 \dots 0.1$ ) и с окном  $5 \times 5$  с очисткой изображения средней интенсивности зашумления ( $p=0.25 \dots 0.75$ ). Также медианный фильтр лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при его средних ( $\sigma = 25 \dots 75$ ) и высоких ( $\sigma = 90 \dots 99$ ) значениях среднеквадратичного отклонения.

Фильтр Винера с окнами  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при малых его значениях среднеквадратичного отклонения ( $\sigma = 1 \dots 5$ ). Также фильтр Винера лучше справляется с импульсным шумом высокой интенсивности зашумления ( $p=0.9 \dots 0.99$ ).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital image processing // Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. – 2007. – 976 p. – ISBN: 978-0-13-168728-8.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. *Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. В.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
4. *Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L.* Digital image processing using MATLAB // Upper Saddle River, NJ: PrenticeHall, Inc. – 2010. – 344 p. – ISBN: 978-0-9820854-0-0.
5. Проблема подавления шума на изображениях и видео и различные подходы к ее решению. – <https://docplayer.ru/57372769-Problema-podavleniya-shuma-na-izobrazheniyah-i-video-i-razlichnye-podhody-k-ee-resheniyu.html> (дата обращения: 10.05.2021).
6. *Buades A., Coll B. and Morel J.M.* A review of image denoising algorithms, with a new one // SIAM Multiscale Modeling and Simulation. – 2005. – Vol. 4. – P. 490-530.
7. Сложение и измерение шума. – [https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC\\_Mathcad\\_Help%2Faddition\\_and\\_noise\\_measurement.html%23](https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Faddition_and_noise_measurement.html%23) (дата обращения: 11.05.2021).

8. Турулин И.И. Управляемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 308 с.
9. Турулин И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
10. Турулин И.И., Ткаченко М.Г. Быстроперестраиваемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 104 с.
11. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Цифровые изображения: от получения до обработки. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с. – ISBN 978-985-6744-80-1.
12. Родионов С.А., Вознесенский Н.Б., Щекольян Э.М. Обработка результатов измерения дисторсии проекционных объективов // Известия вузов. Приборостроение. – 1991. – Т. XXXIV, № 7. – С. 61-68.
13. Миленин Н.К. Шумы в формирователях сигнала на ПЗС // Техника кино и телевидения. – 1980. – № 6. – С. 51-57.
14. Селянкин В.В., Скорород С.В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 82 с.
15. Пример: Медианное и квантильное фильтрование. – [https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC\\_Mathcad\\_Help%2Fexample\\_median\\_and\\_quantile\\_filtering.html%23](https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Fexample_median_and_quantile_filtering.html%23) (дата обращения: 12.05.2021).
16. Fabijańska A., Sankowski D. Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images // IET Image Processing. – 2011. – Vol. 5, Issue 5. – P. 472-480. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
17. Ng P.-E., Ma K.-K. A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images // IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1506-1516. – Doi: 10.1109/TIP.2005.871129.
18. Peixuan Z., Fang L. A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise // IEEE Signal Processing Letters. – 2014. – Vol. 21, Issue 10. – P. 1280-1283. – Doi: 10.1109/LSP.2014.2333012.
19. Roy A., Singha J., Manam L., Laskar R.H. Combination of adaptive vector median filter and weighted mean filter for removal of high-density impulse noise from colour images // IET Image Processing. – 2017. – Vol. 11, Issue 6. – P. 352-361. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2016.0320.
20. Hsieh M.H., Cheng F.H., Shie M.C., Ruan S.J. Fast and efficient median filter for removing 1–99% levels of salt-and-pepper noise in images // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2013. – Vol. 26 (4). – P. 1333-1338. – Doi: 10.1016/j.engappai.2012.10.012.
21. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

## REFERENCES

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing, *Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall*, 2007, 976 p. ISBN: 978-0-13-168728-8.
2. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
3. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V.V. Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatie izobrazheniy i video [Data compression methods. The device of archivers, image and video compression]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003, 384 p.
4. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital image processing using MATLAB, *Upper Saddle River, NJ: PrenticeHall, Inc.*, 2010, 344 p. ISBN: 978-0-9820854-0-0.
5. Problema podavleniya shuma na izobrazheniyakh i video i razlichnye podkhody k ee resheniyu [The problem of noise suppression in images and videos and various approaches to its solution]. Available at: <https://docplayer.ru/57372769-Problema-podavleniya-shuma-na-izobrazheniyah-i-video-i-razlichnye-podhody-k-ee-resheniyu.html> (accessed 10 May 2021).
6. Buades A., Coll B. and Morel J.M. A review of image denoising algorithms, with a new one, *SIAM Multiscale Modeling and Simulation*, 2005, Vol. 4, pp. 490-530.
7. Slozhenie i izmerenie shuma [Adding and measuring noise]. Available at: [https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC\\_Mathcad\\_Help%2Faddition\\_and\\_noise\\_measurement.html%23](https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Faddition_and_noise_measurement.html%23) (accessed 11 May 2021).

8. *Turulin I.I.* Upravlyaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Controlled digital filters: a monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 308 p.
9. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKH-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
10. *Turulin I.I., Tkachenko M.G.* Bystroperestraivaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Fast-tunable digital filters: a monograph]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008, 104 p.
11. *Starovoytov V.V., Golub Yu.I.* Tsifrovye izobrazheniya: ot polucheniya do obrabotki [Digital images: from receiving to processing]. Minsk: OIPI NAN Belarusi, 2014, 202 p. ISBN 978-985-6744-80-1.
12. *Rodionov S.A., Voznesenskiy N.B., Shchekol'yan E.M.* Obrabotka rezultatov izmereniya distorsii proektsionnykh ob'ektiv [Processing of the results of measuring the distortion of projection lenses], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 1991, Vol. XXXIV, No. 7, pp. 61-68.
13. *Milenin N.K.* Shumy v formirovatelnykh signalakh na PZS [Noise in signal formers on a CCD], *Tekhnika kino i televideniya* [Film and television technology], 1980, No. 6, pp. 51-57.
14. *Selyankin V.V., Skorokhod S.V.* Analiz i obrabotka izobrazheniy v zadachakh komp'yuternogo zreniya: ucheb. posobie [Image analysis and processing in computer vision problems: a textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, 82 p.
15. Primer: Mediannoe i kvantil'noe fil'trovanie [Example: Median and quantile filtering]. Available at: [https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC\\_Mathcad\\_Help%2Fexample\\_median\\_and\\_quantile\\_filtering.html%23](https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Fexample_median_and_quantile_filtering.html%23) (accessed 12 May 2021).
16. *Fabijańska A., Sankowski D.* Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images, *IET Image Processing*, 2011, Vol. 5, Issue 5, pp. 472-480. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
17. *Ng P.-E., Ma K.-K.* A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, Vol. 15, Issue 6, pp. 1506-1516. Doi: 10.1109/TIP.2005.871129.
18. *Peixuan Z., Fang L.* A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise, *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, Vol. 21, Issue 10, pp. 1280-1283. Doi: 10.1109/LSP.2014.2333012.
19. *Roy A., Singha J., Manam L., Laskar R.H.* Combination of adaptive vector median filter and weighted mean filter for removal of high-density impulse noise from colour images, *IET Image Processing*, 2017, Vol. 11, Issue 6, pp. 352-361. Doi: 10.1049/iet-ipr.2016.0320.
20. *Hsieh M.H., Cheng F.H., Shie M.C., Ruan S.J.* Fast and efficient median filter for removing 1–99% levels of salt-and-pepper noise in images, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, Vol. 26 (4), pp. 1333-1338. Doi: 10.1016/j.engappai.2012.10.012.
22. *Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spektor A.A.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Digital image processing in information systems: a textbook]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Север Константин Олегович** – Южный федеральный университет; e-mail: sever@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Турулин Игорь Ильич** – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; кафедра информационных измерительных технологий и систем; д.т.н.; профессор.

**Гужва Дмитрий Александрович** – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Sever Konstantin Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: sever@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.

**Turulin Igor Pyich** – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; the department of information measurement technologies and systems; dr. of eng. sciences; professor.

**Guzhva Dmitry Alexandrovich** – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.

Ю.А. Кравченко, А.М. Мансур, Ж.Х. Мохаммад

### МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ СМЫСЛА СЛОВ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДАХ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ\*

*В задачах интеллектуального анализа текста текстовое представление должно быть не только эффективным, но и интерпретируемым, поскольку это позволяет понять операционную логику, лежащую в основе моделей интеллектуального анализа данных. В этой статье предлагается модифицированный метод устранения неоднозначности слов (WSD), который, по сути, имитирует хорошо известный вариант подхода Леска WSD. Для выбранного слова и его контекста алгоритм Леска проводит свои вычисления на основе проверки совпадений контекста слова и каждого определения его смыслов (гloss), для того чтобы выбрать правильное значение. Основным преимуществом данного метода является применение концепции сходства между определением и контекстом вместо «перекрывания», для каждого смысла целевого слова в дополнение к расширению определения примерами предоставленными WordNet. Предлагаемый метод также характеризуется использованием функций измерения схожести текстов, определенных в распределенном семантическом пространстве. Предлагаемый метод протестирован на пяти различных наборах эталонных данных для задачи устранения неоднозначности смысла слов и сравнивался с несколькими базовыми методами, включая Lesk, расширенный Lesk, WordNet 1<sup>st</sup> sense, BabelFy и UKB. Результаты показывают, что предлагаемый метод превосходит большинство известных аналогов, за исключением методов BabelFy и WN 1<sup>st</sup> sense.*

*Устранение неоднозначности слов; WSD; semEval; WordNet; сходство текста; интеллектуальный анализ текста.*

Yu.A. Kravchenko, A.M. Mansour, J.H. Mohammad

### MODIFIED WORD SENSE DISAMBIGUATION METHOD BASED ON DISTRIBUTED REPRESENTATION METHODS

*In the text mining tasks, textual representation should be not only efficient but also interpretable, as this enables an understanding of the operational logic underlying the data mining models. This paper describes a modified Word Sense Disambiguation (WSD) method which extends two well-known variations of the Lesk WSD approach. Given a word and its context, Lesk bases its calculations on the overlap between the context of a word and each definition of its senses (gloss) in order to select the proper meaning. The main contribution of the proposed method is the adoption of the concept of "similarity" between definition and context instead of "overlap", in addition to expanding the definition with examples provided by WordNet for each sense of the target word. The proposed method is also characterized by the use of text similarity measurement functions defined in a distributed semantic space. The proposed method has been tested on five different benchmark datasets for words sense disambiguation tasks and compared with several basic methods, including simple Lesk, extended Lesk, WordNet 1<sup>st</sup> sense, BabelFy and UKB. The results show that proposed method outperforms most basic methods with the exception of BabelFy and the WN 1<sup>st</sup> sense methods.*

*Word sense disambiguation; WordNet; knowledge-based; WSD; semEval; text similarity; text mining.*

**Введение.** Устранение неоднозначности слов WSD (англ. Word Sense Disambiguation) является открытой проблемой в компьютерной лингвистике, ее задача состоит в том, чтобы автоматически определить конкретное значение многозначного слова (смысл, чувства) в данном контексте [1, 2].

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-22019.

Устранение неоднозначности слов (WSD) используется практически во всех приложениях языковых технологий, как машинный перевод, поиск информации, интеллектуальный анализ текста и извлечение информации (IE). При этом применяется в качестве неотъемлемой части извлечения концептов, что считается базовым этапом в таких задачах, как поиск информации, построение профилей пользователей при персонализации веб-контента и рекомендации на основе контента, в дополнение к его приложениям в задачах классификации и кластеризации текстов.

В зависимости от источника знаний, используемого при устранении неоднозначности слов, подходы WSD подразделяются на подходы, основанные на знаниях, подходы с учителем и без учителя. Подходы WSD с учителем / без учителя применяются для получения публичных оценок [3], но для этого требуются большие объемы данных с ручными тегами, создание которых обычно является очень трудоемким процессом.

В качестве альтернативы этим подходам подходы WSD, основанные на знаниях (англ. knowledge-based), используют информацию, содержащуюся в лексической базе знаний (LKB), для выполнения WSD без использования каких-либо дополнительных свидетельств из корпуса. Среди них популярными стали две категории алгоритмов, основанных на знаниях: методы на основе перекрытия и графов. Первый обязан своим успехом простой интуиции, лежащей в основе этого семейства алгоритмов, в то время как распространение второго начало расти после развития семантических сетей.

Алгоритмы на основе перекрытия происходят от алгоритма Леска [4], который вдохновил целое семейство методов, использующих количество общих слов в двух определениях чувств (глоссах) для выбора правильного значения в контексте. Глоссы играют ключевую роль в алгоритме Леска, который использует только два типа информации: 1) набор словарных статей (синсетов), по одной для каждого возможного значения слова, и 2) информацию о контексте, в котором встречается слово. Идея проста: для двух слов алгоритм выбирает те смыслы (синсеты), определения которых имеют максимальное перекрытие, то есть наибольшее количество общих слов в определении смыслов (синсетов).

Этот подход имеет два недостатка: 1) сложность, т.к. количество сравнений комбинаторно увеличивается с количеством слов в тексте; 2) выразительность определения, т.к. перекрытие основано только на совпадении слов в глоссах. Первый недостаток решается с помощью «упрощенной» версии алгоритма Леска [5], которая устраняет неоднозначность каждого слова отдельно. Для данного слова выбирается значение глосса, которое показывает максимальное совпадение с текущим контекстом, представленным окружающими словами. Упрощенный алгоритм Леска значительно превосходит исходный алгоритм Леска, как было доказано в работе [6]. Вторым недостатком исключили Банерджи и Педерсен [7], предложившие «адаптированный» алгоритм Леска. Адаптированная вариация использует отношения между значениями: каждый глосс дополняется определениями семантически связанных значений. Кроме того, в [8] представлен метод *Lesk* с вложением, где используется функция сходства слов, определенная в распределенном семантическом пространстве, для вычисления перекрытия глосс-контекст, при этом создается вектор для представления каждого текста из группы составляющих его векторов слов, а затем применяются методы уменьшения размеров. Этот метод превосходит другие версии *Lesk*, но его недостатком является высокая вычислительная сложность процесса парного сопоставления слов, которая растет при увеличении количества используемых слов текста.

Несмотря на описанные улучшения, алгоритмы, основанные на перекрытии, не отставали от показателей, достигнутых с помощью подходов, основанных на графах. Эти подходы используют хорошо известные методы на основе графов для

поиска и использования структурных свойств графа, лежащего в основе конкретного ЛКВ. Их способность устраняет неоднозначность сразу всех слов в последовательности, при этом используя существующие взаимосвязи (границы) между чувствами (узлами), сделала эти алгоритмы более принципиальными, чем методы, использующие перекрытия определения смысла. Однако, поскольку граф анализируется в целом, они требуют больших вычислительных затрат, используя такие большие графы как WordNet, в дополнение к тому факту, что полностью игнорируется роль определений в процессе устранения неоднозначности слов.

Недавно распределенные методы представления текстов, таких как встроенные слова, достигли современных результатов в задачах text mining, и особенно в задачах оценки сходства текстов. Используя эти методы, каждый текст представлен как низкомерный численный вектор, а затем сходство текстов можно просто измерять с использованием косинусной меры сходства. Соответственно, в данной работе предлагается разработать метод устранения неоднозначности слов, который имитирует метод *Lesk* (с вложением), с той разницей, что, с одной стороны, он применяет методы вложения на уровне текста при векторизации текста контекста и определений и представляет их как плотные низкоразмерные векторы напрямую, без необходимости уменьшения шага размерности, а с другой стороны, расширяет текст определения, чтобы включить примеры, предоставленные базой данных WordNet, что позволяет увеличить выразительность результирующих векторов.

Предложенный метод превосходит все версии *Lesk* и дает результаты, которые конкурируют с другими методами устранения неоднозначности слов.

**1. Аналитический обзор методов устранения неоднозначности слов.** *Лексическая база данных WordNet* используется как источник семантической информации. Для каждого понятия WordNet предоставляет список различных синсетов, каждое с определением (глоссом), объясняющим его значение. Каждый синсет содержит список синонимов или синонимичных словосочетаний и указатели, описывающие отношения между ним и другими синсетами. Определение правильного синонима для каждого термина требует шага обнаружения неоднозначности. Ниже приведены базовые методы WSD, основанные на знаниях.

*Первое чувство WordNet (WN 1<sup>st</sup> sense)*. Эта базовая линия просто выбирает кандидата, который считается первым смыслом (*чувством*) в WordNet 3.0. Несмотря на простоту этого метода, он дает хорошие результаты [2].

*Lesk (простой)* [4], представляет собой простой алгоритм WSD, основанный на знаниях, который основывает свои вычисления на расчете перекрытия между контекстом целевого слова и его определениями, которые даны в реестре смыслов. Основываясь на том же принципе, в различных работах был адаптирован исходный алгоритм с учетом определений из связанных слов (*расширенный Lesk*) [9] или путем вычисления распределительного сходства между определениями и контекстом целевого слова [8].

*Lesk (с вложением)* [8]. В основе этого подхода лежит упрощенный алгоритм *Леска*, однако он использует функцию сходства слов, определенную в распределенном семантическом пространстве, для вычисления перекрытия глосс-контекст. Учитывая текст  $w_1, w_2, \dots, w_n$  из  $n$  слов, он устраняет неоднозначность по одному, принимая во внимание сходство между глоссом, связанным с каждым смыслом целевого слова  $w_i$ , и контекстом. Выбирается значение, глосса которое имеет наибольшее сходство. Контекст может быть представлен подмножеством окружающих слов или всего текста, в котором это слово встречается. Более того, принимая во внимание идею адаптации Банерджи [9], каждый глосс дополняется соответствующими значениями. *BabelNet* используется как реестр чувств, очень большая многоязычная семантическая сеть, построенная на основе WordNet и Wikipedia.

В BabelNet лингвистические знания обогащены энциклопедическими концепциями, взятыми из Википедии. Синсеты WordNet и концепции (страницы) Википедии связаны автоматически.

*Graph-based WSD.* В дополнение к этим подходам, важная ветвь систем, основанных на знаниях, нашла свои методы на структурных свойствах семантических графов из лексических ресурсов [10–12]. Как правило, эти системы WSD на основе графов сначала создают графическое представление входного текста, а затем используют различные алгоритмы на основе графов для данного представления (например, PageRank) и выполнения WSD.

*UKB* – это система WSD на основе графов, которая использует случайные блуждания по семантической сети (в данном случае граф WordNet). UKB применяет алгоритм Personalized Page Rank [13], инициализированный с использованием контекста целевого слова. В отличие от большинства систем WSD, UKB не отступает от эвристики первого смысла WordNet и является самодостаточной (то есть не использует никаких внешних ресурсов / корпусов).

*Babelfy* – это основанный на графах подход к устранению неоднозначности, который использует случайные блуждания для определения связей между синсетами [14]. В частности, *Babelfy* использует случайные обходы с перезапуском по *BabelNet* [15], большой семантической сети, объединяющей WordNet среди других ресурсов, таких как Wikipedia или Wiktionary. Алгоритм метода *Babelfy* основан на эвристике сверхплотного подграфа для выбора семантических интерпретаций с высокой когерентностью вводимого текста. Лучшая конфигурация *Babelfy* учитывает не только целевое предложение, в котором встречается целевое слово, но и весь документ.

**2. Постановка задачи и разработка метода устранения неоднозначности слов.** Пусть имеется контекст  $C$ , фрагментированный из текста, а  $w$  – это слово в этом контексте. Также, пусть  $KB$  – это лексическая база знаний (например, WordNet), которая предоставляет для каждого слова список синсетов, аннотаций, объясняющих множественные значения слова, причём каждый синсет имеет определение (глосс) и примеры того, как он используется в языке.

Задача состоит в том, чтобы определить правильное значение слова  $w$  в данном контексте  $C$ , используя информацию лексической базы данных  $KB$ . Задача решается путём измерения сходства между текстом контекста и текстами синсетов целевого слова, а затем выбирается синсет, который достигает наивысшей степени сходства с контекстом. Алгоритм предлагаемого метода описывается следующими шагами.

*Шаг 1.* Для контекста  $C$  и целевого слова  $w$  (неоднозначное слово) извлекается набор синсетов  $S = (S_0, S_1, \dots, S_N)$  с помощью WordNet. Затем для каждого синсета извлекается определение  $O = (o_1, o_2, \dots, o_N)$  и набор примеров  $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$ . Предлагается объединить определение с примерами как единый текст в так называемой аннотации синсета:

$$T_{\text{аннотации}} = \text{concatenate}(\Pi, O) = (t_1, t_2, \dots, t_N).$$

*Шаг 2.* Тексты контекста и аннотация для каждого синсета представляются в виде числовых векторов. Существует много известных методов векторизации текста, однако в данной работе авторы предлагают использовать один из следующих методов, поскольку они позволили достичь наилучших результатов в области схожести текстов [16, 17].

1. Среднее значение вложений слов (на уровне слов), когда каждый текст представлен средним вектором встраивания всех слов, которые появляются в тексте. Можно использовать любой из методов генерации вложений таких как, *Word2vec* и *GloVe* [18, 19].

2. Вложения *Sentence-BERT (SBERT)* (на уровне предложения) – это модификация предварительно обученной сети *BERT*, в которой используются сиамские и триплетные сетевые структуры для получения семантически значимых вложений предложений, которые можно сравнивать с использованием косинусного сходства:

$$\mathbf{t}_i^B = \text{Вложения}(\mathbf{t}_i), \mathbf{t}_i^G = \text{Вложения}(\mathbf{t}_i), \quad (1)$$

где,  $\mathbf{t}_i^B$  – это вектор вложения аннотации  $i$ -го синсета, а  $B, G$  указывают тип используемого вложения ( $B$  – *BERT*,  $G$  – *GloVe*)

*Шаг 3.* Измерение сходства между контекстом  $K$  и аннотацией  $\mathbf{t}_i^B$  с помощью меры сходства косинуса, задаваемой следующей формулой:

$$\text{sim}(\mathbf{t}_i, K) = \cos(\theta) = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}}{\|\mathbf{x}\| \cdot \|\mathbf{y}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}}, \quad (2)$$

где  $X_i$  и  $Y_i$  – компоненты вектора вложения контекста и аннотация  $K$  и  $\mathbf{t}_i^B$ , соответственно.

Степень сходства можно рассчитать с использованием одного или обоих методов векторизации, а затем принять среднее значение в качестве окончательного значения сходства:

$$\text{sim} = f(\text{Sim}_{GloVe}, \text{Sim}_{Bert}). \quad (3)$$

Синсеты ранжируются по степени сходства, затем выбирается синсет с наивысшим показателем схожести. Логика работы предложенного метода устранения неоднозначности слов показывает представленный ниже алгоритм.

---

#### Алгоритм устранения неоднозначности слов

---

<b>Ввод</b>	Контекст $K$ , многозначное целевое слово $w$ , лексическая база данных WordNet
	$S_{best}$ Конкретное значение слова $w$ в данном контексте
<b>Вывод</b>	
1:	$S = (S_0, S_1, \dots, S_N)$ // Список возможных синсетов (чувств) слова извлекается из WordNet
2:	$O = (o_1, o_2, \dots, o_N)$ //извлекается определение (глосс) каждого синсета
3:	$\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$ //извлекается набор примеров (examples) каждого синсета
4:	$T_{np} = \Pi + O = (\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_N)$ // Текст определения и примеры объединены
5:	$K^B = Bert(K)$ // Представление текста контекста в виде вектора с помощью вложений Берта $K^G = avgGloVe(K)$ // Представление текста контекста в виде вектора с помощью вложений GloVe
6:	$N = \text{len}(S)$ //количество чувств $\text{Similarity\_scores} = []$
7:	<b>for</b> $i = 0$ <b>to</b> $N$ <b>do</b>
8:	$\mathbf{t}_i^G = avgGloVe(\mathbf{t}_i)$ // Представление текста синсета $S[i]$ в виде вектора с помощью вложений avgGloVe $\mathbf{t}_i^B = Bert(\mathbf{t}_i)$ // Представление текста синсета $S[i]$ в виде вектора с помощью вложений Берта
9:	$\text{Sim}_{GloVe} = \cos(\overrightarrow{\mathbf{t}_i^G}, \overrightarrow{K^G})$ $\text{Sim}_{Bert} = \cos(\overrightarrow{\mathbf{t}_i^B}, \overrightarrow{K^B})$
10:	$\text{sim} = f(\text{Sim}_{GloVe}, \text{Sim}_{Bert})$ // общее сходство $\text{Similarity\_scores}[i] \leftarrow \text{sim}$
11:	<b>end</b>
12:	$S_{best} = \text{max}(\text{Sort}(S, \text{Similarity\_scores}))$ // Ранжирование синсетов по степени сходства с использованием одного или комбинации предыдущих мер и выбрать первый

**3. Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов.** Эффективность метода оценивалась путем сравнения его с несколькими другими методами на стандартном наборе данных, предназначенных для решения задачи устранения неоднозначности слов. Приведем описание использованных наборов данных и метрик оценки.

Для оценки предложенного метода использовались пять наборов данных, представленных в табл. 1.

- ◆ Senseval-2 (Se2) [20]. Этот набор данных изначально был аннотирован WordNet 1.7. После стандартизации он состоит из 2282 смысловых аннотаций, включая существительные, глаголы, наречия и прилагательные.

- ◆ Senseval-3 (Se3) [21]. Этот набор данных состоит из трех документов, относящихся к трем различным областям (редакционная, новостная и художественная), всего 1850 смысловых аннотаций. Версия WordNet этого набора данных была 1.7.1.

- ◆ SemEval-07 (Se7) [3]. Этот набор данных содержит 455 смысловых аннотаций только для существительных и глаголов. Изначально он был аннотирован с помощью инвентаризации WordNet 2.1.

- ◆ SemEval-13 (Se13) [22]. Этот набор данных включает тринадцать документов из разных доменов. Исходной инвентаризацией смысла был WordNet 3.0. Количество смысловых аннотаций – 1644, хотя учитываются только существительные.

- ◆ SemEval-15 (Se15) [14]. Это самый последний доступный на сегодняшний день набор данных WSD, аннотированный с помощью WordNet 3.0. Он состоит из 1022 смысловых аннотаций в четырех документах из трех разнородных областей: биомедицины; математики вычислений и социальных вопросов.

Согласно [2], уровень неоднозначности каждого набора данных вычисляется как общее количество возможных смыслов разделенное на количество смысловых аннотаций. Значение неоднозначности может указывать на то, насколько сложным может быть данный набор данных. В этом случае SemEval-07 отображает самый высокий уровень неоднозначности среди всех наборов оценочных данных.

Таблица 2

**Наборы использованных данных**

Набор данных	Кол-во документов	Кол-во предложения	Кол-во аннотаций	Неоднозначность
SensEval-2	3	242	2282	5.4
SensEval-3	3	352	1850	6.8
SemEval-7	3	135	455	8.5
SemEval-13	13	306	1644	4.9
SemEval-15	4	138	1022	5.5

В задачах WSD для измерения соответствия между предсказанным сходством и принятым стандартом, т.е. среднего сходства по оценке экспертов-людей, используется известная *F*-мера.

*F*-мера – это мера точности теста. Она представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой, где точность – это количество истинно положительных результатов, деленное на количество всех положительных результатов, включая те, которые не были идентифицированы правильно, а полнота – это количество истинно положительных результатов, разделенное на количество всех выборок, которые должны были быть идентифицированы как положительные.

$$F \text{ – мера} = \frac{2 \times \text{точность} \times \text{Полнота}}{\text{точность} + \text{Полнота}}. \quad (4)$$

где

$$\text{Точность} = \frac{\text{сумма долей правильных прогнозов}}{\text{сумма долей правильных прогнозов} + \text{сумма долей неверных прогнозов}} \quad (5)$$

$$\text{Полнота} = \frac{\text{сумма долей правильных прогнозов}}{\text{количество экземпляров истинности}} \quad (6)$$

В частности, доля неверных прогнозов вычисляется из ложноположительных прогнозов системы.

В проведенном вычислительном эксперименте сначала несколько реализаций предложенного метода были протестированы с разными аннотациями, только с определением, только с примерами, а затем путем объединения определения с примерами. Затем предложенный метод оценивался по результатам решения задачи устранения неоднозначности слов путем сравнения с семью проанализированными ранее методами, а именно: *WN 1<sup>st</sup> sense*; *Lesk (простой)*; *Lesk (расширенный)*; *Lesk (с вложением)*; *UKB*; *UKB* (глосс) и *BabelFy*.

Кроме того, был проведен дополнительный эксперимент, идея которого заключается в объединении предложенного метода с одним из эффективных и проверенных канонических алгоритмов решения задач устранения неоднозначности, таких как *BabelFy* и *WordNet 1<sup>st</sup> sense*. Это необходимо для оценки того, дает ли предлагаемый метод дополнительное качество решений, которое указанные методы не достигают. Результаты эксперимента показаны в табл. 2.

Таблица 3

Результаты WSD по F-мере

		<i>F-Мера на наборе данных</i>				
<i>Методы</i>		<i>se2</i>	<i>se3</i>	<i>se7</i>	<i>se13</i>	<i>se15</i>
<i>WN 1<sup>st</sup> sense</i>		66.8	<b>66.2</b>	55.2	62.95	67.8
<i>Lesk (простой)</i>		40.29	35.94	22.63	38.27	41.21
<i>Lesk (расширенный)</i>		50.6	44.5	32.0	53.6	51.0
<i>Lesk (с вложением)</i>		63.0	63.7	<b>56.7</b>	66.2	64.6
<i>UKB<sub>глосс</sub></i>		60.6	54.1	42.0	59.0	61.2
<i>UKB</i>		56	51.7	39.0	53.6	55.2
<i>BabelFy</i>		<b>67.0</b>	63.5	51.6	<b>66.4</b>	70.3
<i>Предлагаемый метод</i>						
<i>Avg-GloVe</i>	<i>Примеры + Глосс</i>	<b>56.96</b>	51.78	38.46	57.11	<b>64.38</b>
	<i>Глосс</i>	53.06	48.48	34.28	56.2	59.98
	<i>Примеры</i>	51.84	48.81	35.6	46.3	54.4
<i>STS BERT</i>	<i>Примеры + Глосс</i>	55.43	<b>52.27</b>	<b>42.63</b>	<b>58.94</b>	62.91
	<i>Глосс</i>	51.44	48.91	38.24	54.13	58.31
	<i>Примеры</i>	48.11	44.86	35.38	44.82	51.07
<i>WN 1<sup>st</sup> + glove 0.14</i>		<b>68.14*</b>	64.43	51.43	<b>66.18</b>	<b>71.74*</b>

При реализации предложенного метода, для каждого синсета извлекается определение и набор доступных примеров. Чтобы проанализировать влияние каждого из них в отдельности, эксперименты были проведены с использованием определения и примеров как независимых текстов, так и дополнения в виде их объединения в один текст.

Для векторизации текстов на уровне слов с помощью среднего значения вложений слов используется предварительно обученная модель *GloVe* [18], которая была обучена на наборе данных *Wikipedia 2014+360 Gigaword5*. *SBERT SentenceTransformers* и использовалась как метод векторизации предложений, а также является фреймворком *Python* для современных вложений предложений, текста и изображений [16].

Для метода *Леска* (расширенного и с вложением) использовалась та же реализация, предложенная в [2], а для реализация простого *Леска* использовалась функция, предоставляемая библиотекой *NLTK* в *Python*. Для *UKB* использовались обе конфигурации по умолчанию: с использованием графа *WordNet (UKB)* и полного графа, включая устраненные неоднозначности и глоссы в качестве соединений (глосс *UKB*).

Табл. 2 показывает результаты экспериментов по задаче устранения неоднозначности слов, причём, имеется несоответствие производительности систем по наборам данных, поскольку во всех случаях существует большой разрыв в производительности между лучшим и худшим набором данных. Уровень неоднозначности может указывать на то, насколько сложным может быть соответствующий набор данных. Фактически, системы WSD получают относительно низкие результаты в наборе *SemEval-07*, который является наиболее неоднозначным набором данных (см. табл. 1).

Для различных реализаций предложенного метода (жирные и подчеркнутые значения) наблюдается, что *BERT* достигает значений *F*-меры выше, чем *avg-GloVe* на наборах данных *semEval-13*, *semEval-7* и *sensEval-3*, тогда как *avg-GloVe* дает лучшие результаты в *semEval-15* и наборах данных *sensEval-2*, которые согласно табл. 1 менее неоднозначны. Это можно логически объяснить способностью *BERT* улавливать семантические отношения на уровне предложения лучше, чем *avg-GloVe*.

Также, отмечается, что производительность метода в случае объединения примеров с определениями намного лучше, чем если бы каждый из них использовался независимо. В целом производительность метода при использовании определений (будь то с *BERT* или *avg-GloVe*) лучше, чем при использовании примеров, и это связано с тем, что не во всех синтаксисах есть примеры, и поэтому разработанная система будет рассматривать их как ложноположительные прогнозы.

Что касается сравнения производительности разработанного метода с другими методами, следует отметить, что предложенный метод превзошел *Lesk* (простой) и *Lesk* (расширенный) по всем наборам данных, но он не смог превзойти расширенную версию *Lesk* (с вложением), что имеет смысл, поскольку *Lesk* (с вложением) опирается на несколько внешних источников для "определений", такие как *WordNet* и *Wikipedia*, а разработанный метод использует только информацию, предоставленную *WordNet*.

Также предложенный метод (с векторизации *avg-GloVe*) превзошел *UKB* по всем наборам данных, в то время как он превзошел расширенную версию *UKB<sub>глосс</sub>* только в наборе данных *semEval-15*. Предложенный метод не смог превзойти ни *BabelFy*, ни алгоритм *WN 1<sup>st</sup> sense*. Фактически, несмотря на простоту *WN 1<sup>st</sup> sense*, автоматические системы WSD не могут превзойти этот базовый уровень [11, 23].

На основе результатов, представленных в таблице 2, был выбран метод «*WN 1<sup>st</sup> sens*» для второго эксперимента по объединению с предлагаемым методом, учитывая его эффективность, простоту и легкость реализации. Что касается порога сравнения, то он был установлен экспериментально, где порог 0,14 дал наилучшие результаты по всем наборам данных. Результаты экспериментов в таблице 2, отмеченные звездочкой, показывают, что процесс слияния привел к значительному улучшению производительности обоих методов и превысил все базовые показатели на наборах данных *SensEval-2* и *SemEval-15*, при этом достигнув значений, очень близких к максимальным значениям на остальных наборах данных.

**Заключение.** В данной работе представлена разработка модифицированного метода устранения неоднозначности слов WSD (англ. *Word Sense Disambiguation*), который по своему механизму имитирует хорошо известный вариант метода Леска «с вложением», характеризующийся применением концепции сходства между определением и контекстом.

Предлагаемый метод отличается простотой по сравнению с другими методами и использованием новейших доступных методов представления текста. Кроме того, метод использует преимущества примеров, предоставленных WordNet, чтобы получить достаточное объяснение каждого понятия в дополнение к определению, что позволяет уточнить векторы, используемые в аннотации, описывающей каждый синсет, это приводит к повышению точности определения правильного значения неоднозначного слова.

Поскольку определение значения слова связано с его контекстом и предметом документа, в котором оно встречается, вполне вероятно, что предложенный метод будет лучше работать в рамках других практических задач, в которых WSD является подзадачей.

Таким образом, для проверки эффективности предложенного метода проводилось его тестирование при решении других практических задач, таких как оценка сходства между текстами, классификация текстов, кластеризация, извлечение понятий, рекомендация, основанная на содержании, поиск информации, а также изучалось его влияние на выполнение этих задач по сравнению с другими методами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pal A.R., Saha D.J. a. p. a. Word sense disambiguation: A survey, 2015.
2. Raganato A., Camacho-Collados J., Navigli R. Word sense disambiguation: A unified evaluation framework and empirical comparison, *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Vol. 1. Long Papers*, 2017, pp. 99-110.
3. Pradhan S., Loper E., Dligach D., Palmer M. Semeval-2007 task-17: English lexical sample, srl and all words, *Proceedings of the fourth international workshop on semantic evaluations (SemEval-2007)*, 2007, pp. 87-92.
4. Lesk M. Automatic sense disambiguation using machine readable dictionaries: how to tell a pine cone from an ice cream cone, *Proceedings of the 5th annual international conference on Systems documentation*, 1986, pp. 24-26.
5. Kilgarriff A., Rosenzweig J. Framework and results for English SENSEVAL, *Computers the Humanities*, 2000, Vol. 34, No. 1, pp. 15-48.
6. Vasilescu F., Langlais P., Lapalme G. Evaluating Variants of the Lesk Approach for Disambiguating Words, *Lrec.*, 2004.
7. Banerjee S., Pedersen T. An adapted Lesk algorithm for word sense disambiguation using WordNet, *International conference on intelligent text processing and computational linguistics*. Springer, 2002, pp. 136-145.
8. Basile P., Caputo A., Semeraro G. An enhanced lesk word sense disambiguation algorithm through a distributional semantic model, *Proceedings of COLING 2014, the 25th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers*, 2014, pp. 1591-1600.
9. Banerjee S., Pedersen T. Extended gloss overlaps as a measure of semantic relatedness, *Ijcai.*, Vol. 3. Citeseer, 2003, pp. 805-810.
10. Agirre E., Soroa A. Personalizing PageRank for Word Sense Disambiguation, *EACL*, 2009.
11. Agirre E., Lopez de Lacalle O., Soroa A. Random walks for knowledge-based word sense disambiguation, *Computational Linguistics*, 2014, Vol. 40, No. 1, pp. 57-84.
12. Tripodi R., Pelillo M. A game-theoretic approach to word sense disambiguation, *Computational Linguistics*, 2017, Vol. 43, No. 1, pp. 31-70.
13. Haveliwala T.H. Topic-sensitive pagerank: A context-sensitive ranking algorithm for web search, *IEEE transactions on knowledge data engineering*, 2003, Vol. 15, No. 4, pp. 784-796.

14. Moro A., Navigli R. Semeval-2015 task 13: Multilingual all-words sense disambiguation and entity linking, *Proceedings of the 9th international workshop on semantic evaluation (SemEval 2015)*, 2015, pp. 288-297.
15. Navigli R., Ponzetto S.P. BabelNet: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network, *Artificial intelligence*, 2012, Vol. 193, pp. 217-250.
16. Reimers N., Gurevych I. Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks, *arXiv preprint arXiv: 10084*, 2019.
17. Iacobacci I., Pilehvar M.T., Navigli R. Embeddings for word sense disambiguation: An evaluation study, *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Vol. 1: Long Papers)*, 2016, pp. 897-907.
18. Pennington J., Socher R., Manning C.D. Glove: Global vectors for word representation, *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*, 2014, pp. 1532-1543.
19. Kenter T., De Rijke M. Short text similarity with word embeddings, *Proceedings of the 24th ACM international on conference on information and knowledge management*, 2015, pp. 1411-1420.
20. Edmonds P., Cotton S. Senseval-2: overview, *Proceedings of SENSEVAL-2 Second International Workshop on Evaluating Word Sense Disambiguation Systems*, 2001, pp. 1-5.
21. Snyder B., Palmer M. The English all-words task, *Proceedings of SENSEVAL-3, the Third International Workshop on the Evaluation of Systems for the Semantic Analysis of Text*, 2004, pp. 41-43.
22. Navigli R., Jurgens D., Vannella D. Semeval-2013 task 12: Multilingual word sense disambiguation, *Second Joint Conference on Lexical and Computational Semantics (\* SEM). Vol. 2: Proceedings of the Seventh International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval 2013)*, 2013, pp. 222-231.
23. Navigli R.J.A. c. s. Word sense disambiguation: A survey, 2009, Vol. 41, No. 2, pp. 1-69.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент С.Г. Буланов.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79289080151; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Мансур Али Махмуд** – e-mail: mansur@sfedu.com; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Мохаммад Жуман Хуссейн** – e-mail: zmohammad@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289080151; the department of computer aided design; associate professor.

**Mansour Ali Mahmoud** – e-mail: mansur@sfedu.com; phone: +78634371651; the department of computer aided design; graduate student.

**Mohammad Juman Hussain** – e-mail: zmohammad@sfedu.ru; the department of computer aided design; graduate student.

Д.А. Гужва, К.О. Север, А.А. Морозов

### АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

*Рассмотрены фильтры с конечной импульсной характеристикой и банки фильтров. Рассмотрено использование данных фильтров для слуховых аппаратов. Рассмотрены способы компенсации потери слуха и способы повышения громкости с помощью широкополосного усиления. Приведена схема метода цифровой обработки сигналов с использованием банка фильтров, а также методика синтеза интерполяционных фильтров с малой вычислительной сложностью. Также рассмотрено применение системы MATLAB для синтеза узкополосных нерекурсивных КИХ-фильтров, их процедура проектирования, методика и примеры. Фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и банки фильтров обладают определенными свойствами, которые гарантируют стабильность. Поэтому они популярны во многих приложениях, таких как системы связи, обработка аудиосигналов, биомедицинские инструменты и так далее. К сожалению, из-за большей длины волны стоимость реализации КИХ-фильтра обычно выше, чем фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), отвечающий тем же требованиям. Хорошо известно, что длина КИХ-фильтра обратно пропорциональна его переходной полосе пропускания. Поэтому недостаток становится острым, когда данный фильтр имеет узкую полосу перехода. Основная цель - рассмотреть эффективные с вычислительной точки зрения методы проектирования КИХ-фильтров и банков фильтров. Метод маскирования (FRM) приводит к значительной экономии количества множителей. Затем рассматривается 16-полосный блок цифровых КИХ-фильтров с неравномерным разнесением и низкой групповой задержкой. Общая задержка значительно снижена в результате новой структуры фильтра, которая снижает коэффициент интерполяции для фильтров-прототипов. Маскирующий фильтр может быть фильтром с интерполированной конечной импульсной характеристикой (ИКИХ), который способствует снижению сложности.*

*Рекурсивный КИХ-фильтр; БИХ-фильтр; MCL; HT; UCL; SRT; банк фильтров; МЧХ; ИКИХ.*

D.A. Guzhva, K.O. Sever, A.A. Morozov

### ANALYSIS OF THE CONTROLLABILITY OF SOME DIGITAL FILTERS WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE

*This overview article covers finite impulse response filters and filter banks. The use of these filters for hearing aids is considered. Ways to compensate for hearing loss and ways to increase loudness using broadband amplification are considered. A schematic diagram of a method for digital signal processing using a bank of filters, as well as a technique for synthesizing interpolation filters with low computational complexity, is presented. Also, the application of the MATLAB system for the synthesis of narrow-band non-recursive FIR filters, their design procedure, methodology and examples are considered. Finite Impulse Response (FIR) filters and filter banks have specific properties that guarantee stability. Therefore, they are popular in many applications such as communication systems, audio signal processing, biomedical instruments, and so on. Unfortunately, due to the longer wavelength, the cost of implementing an FIR filter is usually not higher than an infinite impulse response (IIR) filter that meets the same requirements. It is well known that the length of an FIR filter is inversely proportional to its transition bandwidth. Therefore, the disadvantage becomes acute when a given filter has a narrow transition band. The main goal is to consider computationally efficient methods for designing FIR filters and filter banks. The masking method (FRM) results in significant savings in the number of multipliers. Next, a 16-band, low group delay, non-equal-spacing digital FIR filter bank is considered. Overall latency is significantly reduced as a result of a new filter structure that reduces the interpolation factor for prototype filters. Masking filter may be an interpolated finite impulse response (IFIR) filter that helps reduce complexity.*

*Recursive FIR filter; IIR filter; MCL; HT; UCL; SRT; filter bank; MFC; IFIR.*

**Введение.** Фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ) могут иметь линейную фазочастотную характеристику (ФЧХ), проходящую через ноль системы координат, которая обеспечивается при симметричной КИХ.

Поэтому они популярны во многих приложениях, таких как системы связи, обработка аудиосигналов, биомедицинская аппаратура и т.д.

К сожалению, из-за большей длины КИХ стоимость реализации СБИС фильтра для КИХ-фильтров, как правило, выше, чем у фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) примерно с такими же характеристиками не считая того, что у БИХ-фильтров ФЧХ принципиально нелинейна (максимально линейна у фильтров Бесселя).

Известно, что длина КИХ фильтра нижних частот (ФНЧ) обратно пропорциональна его полосе пропускания (для ФНЧ – частоте среза). Поэтому вычислительная сложность алгоритма фильтрации велика, когда фильтр узкополосен.

**Цель работы** – проанализировать и разработать методы, алгоритмы и структуры, обладающие малой вычислительной сложностью КИХ-фильтрации на примере фильтров для слуховых аппаратов.

**Постановка задачи:** рассматриваются особенности реализации слуховых аппаратов; анализируются методы проектирования эффективных по вычислительной сложности КИХ-фильтров, в частности, возможность применения банка фильтров для снижения вычислительных затрат. Рассматривается возможность применения методики синтеза узкополосных КИХ-фильтров на основе двухкаскадной структуры, при помощи пакета Signal Processing Toolbox системы MATLAB. Приводятся результаты расчета фильтров.

**Использования банков фильтров в цифровом слуховом аппарате.** Аудиометрические данные, используемые для описания производительности слухового аппарата включают порог слуха (НТ), уровень наиболее комфортной громкости (MCL) и уровень неудобной громкости (UCL).

MCL – это уровень интенсивности речи, который наиболее громкий. Для большинства людей с нормальным слухом речь наиболее комфортна на 40–50 дБ выше порога распознавания речи (SRT) [1].

Отношение UCL к НТ известен как динамический диапазон, который устанавливает ограничение на максимальную мощность слуховых аппаратов.

Один из способов компенсировать потерю слуха – повысить громкость речи с помощью широкополосного усиления.

На рис. 1 показан эффект усиления речи на 20 дБ.

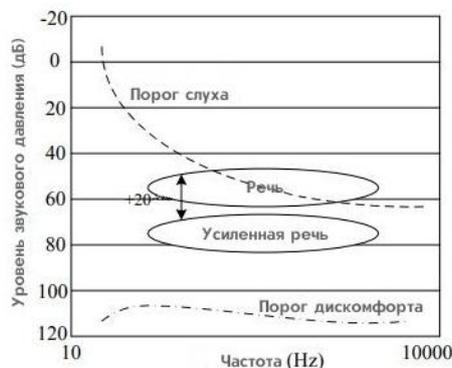


Рис. 1. Эффект усиления речи на 20 дБ

Перед усилением в высокочастотном диапазоне интенсивность речи меньше порогов слышимости, что означает, что речь в этом диапазоне не может быть услышана [2].

После усиления на 20 дБ можно услышать всю речь. В этом случае интенсивность усиленной речи меньше порога дискомфорта.

Однако иногда метод широкополосного усиления вызывает проблемы. На рис. 2, интенсивность некоторых звуков речи больше, чем пороги дискомфорта после усиления, потому что усиление применяется ко всей частоте.

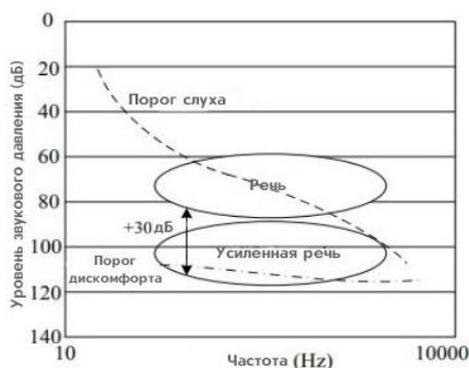


Рис. 2. Проблемы метода широкополосного усиления

Одним из способов решения этой проблемы является использование алгоритма на основе банка фильтров.

Весь диапазон частот разделен на несколько поддиапазонов, и каждый поддиапазон имеет свой собственный коэффициент усиления. Метод, основанный на банке фильтров, позволяет избежать того, чтобы низкочастотные звуки превышали пороговые значения дискомфорта, как показано на рис. 3 [3, 4].

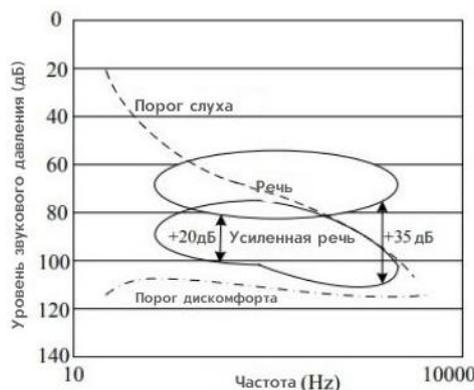


Рис. 3. Использование разных коэффициентов усиления для разных диапазонов

Алгоритм, основанный на банке фильтров, позволяет легко регулировать усиление речи [5].

В пределах рассматриваемого речевого спектра регулировка полностью программируется и способна обеспечить комфорт пациентов.

Структурная схема устройства цифровой обработки сигналов с использованием банка фильтров приведена на рис. 4 [6].

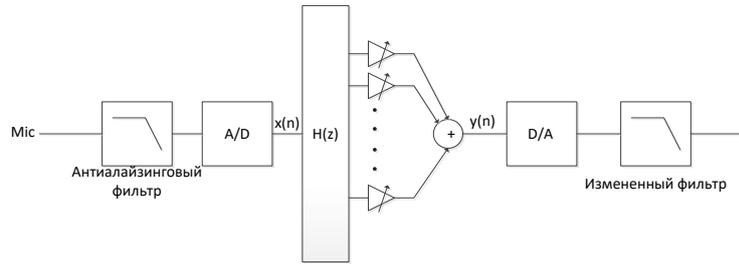


Рис. 4. Структурная схема устройства цифровой обработки сигналов с использованием банка фильтров приведена

Вычислительная сложность цифровых КИХ-фильтров увеличивается с уменьшением полосы пропускания ФНЧ (частоты его среза), поскольку длина КИХ в общем случае обратно пропорциональна частоте среза. Для снижения вычислительной сложности алгоритма фильтра применяется интерполяция, т.е. каскадное соединение фильтров, в простейшем случае двух [7]. Первый фильтр имеет длинную, но прореженную КИХ с относительно небольшим числом ненулевых отсчетов (коэффициентов). Достоинством его является высокая крутизна переходной полосы АЧХ и ее узость, недостатком – многополосность (из-за вторичной дискретизации при прореживании КИХ получается вторичная периодичность АЧХ). Второй каскад – интерполяционный фильтр, который как бы заполняет (при свёртке КИХ обоих фильтров) нули КИХ первого фильтра промежуточными отсчетами без лишних операций. В частотной области получается перемножение АЧХ, в результате чего получается узкополосный фильтр с крутой переходной полосой и отсутствием паразитных полос. При этом вычислительная сложность (пропорциональна суммарному числу ненулевых коэффициентов фильтра в целом) оказывается гораздо меньше, чем при прямой реализации цифрового ФНЧ. Если ФНЧ реализовать в виде рекурсивного КИХ-фильтра [8], то фильтр может иметь малую вычислительную сложность без применения интерполяции. Если рекурсивный КИХ-фильтр реализовать на звеньях с прямоугольной КИХ, то легко обеспечить управляемость фильтра изменением длины блоков задержки, определяющей длину КИХ, а значит, частоту среза [9]. В [10] рассмотрены управляемые рекурсивные БИХ-фильтры.

**Конструкция КИХ-фильтра с малой вычислительной сложностью, основанная на подходе маскирования частотной характеристики.** Метод маскирования частотной характеристики [16] – эффективный способ создания фильтров с произвольной полосой пропускания.

Частотная характеристика фильтра МЧХ (маскировка частотной характеристики) с нулевой фазой может быть записана как

$$H(\omega) = G(\omega)H_{\text{ma}}(\omega) + [1 - G(\omega)]H_{\text{mc}}(\omega), \quad (1)$$

где  $H_{\text{ma}}(\omega)$  и  $H_{\text{mc}}(\omega)$  – частотная характеристика маскирующих фильтров, длины которых должны быть как нечетными, так и четными.

$G(\omega)$  – частотная характеристика фильтра, формирующего границу полосы [11–13].

Для обычного МЧХ  $G(\omega) = H_a(M\omega)$ .

Это означает, что вместо того, чтобы разрабатывать резкий фильтр  $H(z)$  с полосой перехода  $\Delta B$ , напрямую, создается фильтр  $H_a(z)$  с полосой перехода  $M \Delta B$ , который затем интерполируется с коэффициентом  $M$ .

Нежелательные полосы пропускания удаляются двумя маскирующими фильтрами.  $H_{ma}(z)$  и  $H_{mc}(z)$ .

Общий фильтр  $H(z)$  получается путем объединения выходных сигналов двух маскирующих фильтров.

Роль  $G(z)$  – формирование желаемой переходной полосы.

Интерполированный фильтр  $H_a(z^M)$  хорошо подходит для реализации  $G(z)$  [14–20].

Однако для  $G(z)$  необязательно иметь периодические полосы пропускания и полосы задерживания, пока он выполняет роль формирования границы полосы.

Уменьшение сложности схемы МЧХ рассмотрено в [21–23].

В этой статье рассмотрена структура, которая может еще больше снизить сложность фильтров МЧХ.

Основная идея состоит в том, чтобы использовать метод частотной маскировки с одним фильтром [24, 25] для разработки  $G(z)$ .

**Структура фильтра.** Структура фильтра представлена на рис. 5. На первый взгляд структура выглядит как двухступенчатый фильтр МЧХ. Тем не менее, это не так.

Для двухступенчатого фильтра МЧХ  $P$  должно быть равно  $Q$ , тогда как в этой структуре  $P$  и  $Q$  могут не совпадать.

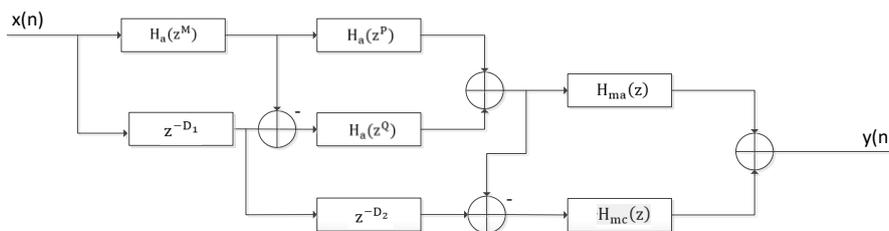


Рис. 5. Предлагаемая структура синтеза

Согласно рис. 5, частотная характеристика фильтра, формирующего границу полосы  $G(z)$ , при нулевой фазе может быть задана формулой (2)

$$G(\omega) = H_a(M\omega)H_a(P\omega) + [1 - H_a(M\omega)]H_a(Q\omega), \quad (2)$$

Параметры, которые необходимо определить, следующие.

1) Границы полосы пропускания и полосы задерживания  $\theta_a$  и  $\varphi_a$  прототипа фильтра  $H_a(z)$ .

2) Коэффициенты интерполяции  $M$ ,  $P$  и  $Q$ .

3) Границы полосы пропускания и полосы задерживания,  $\omega_{pma}$  и  $\omega_{sma}$ , маскирующего фильтра  $H_{ma}(z)$ .

4) Границы полосы пропускания и полосы задерживания,  $\omega_{pmc}$  и  $\omega_{smc}$ , маскирующего фильтра  $H_{mc}(z)$ .

Как и в оригинальной схеме МЧХ, существует два разных варианта проектирования, то есть случай А и случай В.

В схеме случая А одна из переходных полос  $H_a(z^M)$  образует переходную полосу всего фильтра.

В случае варианта В дополнение  $H_a(z^M)$  образует переходную полосу всего фильтра.

Следует отметить, что иногда вместо  $H_a(z^P)$  и  $H_a(z^Q)$  используются их дополнения.

Частотная характеристика  $G(z)$  не является периодической.

Кроме того, можно оценить, что  $P$  и  $Q$  не могут быть очень большими числами, поскольку большие  $P$  и  $Q$  приводят к маленьким  $d_1$  и  $d_2$ , что приводит к большим длинам  $H_{ma}(z)$  и  $H_{mc}(z)$ .

**Процедура проектирования.** Предположим, что края полосы пропускания и полосы задерживания всего фильтра  $H(z)$  равны  $\omega_p$  и  $\omega_s$  соответственно.

Края полосы пропускания и полосы задерживания прототипа фильтра  $H_a(z)$ ,  $\theta_a$  и  $\varphi_a$  могут быть найдены с помощью следующих уравнений [16].

Для случая А,

$$m = \left\lceil \frac{\omega_p M}{2\pi} \right\rceil, \quad (3)$$

$$\theta_a = [\omega_p M - 2m\pi], \quad (4)$$

$$\varphi_a = [\omega_s M - 2m\pi], \quad (5)$$

Для случая В,

$$m = \left\lfloor \frac{\omega_s M}{2\pi} \right\rfloor, \quad (6)$$

$$\theta_a = [2m\pi - \omega_s M], \quad (7)$$

$$\varphi_a = [2m\pi - \omega_p M], \quad (8)$$

где  $M$  – коэффициент интерполяции;  $[\omega_p M - 2m\pi]$  – наибольшее целое число, меньшее  $\omega_p M - 2m\pi$ , а;  $[2m\pi - \omega_s M]$  – наименьшее целое число, превышающее  $\omega_s M - 2m\pi$ .

Только одно из двух множеств удовлетворяет условию  $0 < \theta_a < \varphi_a < \pi$ .

**Применение системы MATLAB для синтеза узкополосных нерекурсивных КИХ-фильтров.** В ряде задач цифровой обработки сигналов требуются фильтры с линейной фазо-частотной характеристикой (ФЧХ). К таким задачам относятся корреляционная обработка, формирование диаграмм направленности антенн, обработка изображений и др. Устойчивые БИХ-фильтры имеют принципиально нелинейную ФЧХ, поэтому в перечисленных областях обычно используются нерекурсивные фильтры [26]. В случае малой неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и малой ширины ее переходной полосы длина конечной импульсной характеристики (КИХ) оказывается значительной, что ведет к большому числу операций на отсчет сигнала. В [27] рассмотрена методика проектирования, которая обладает высокой эффективностью при реализации узкополосных фильтров, основанная на процессах децимации и интерполяции отсчетов выходного сигнала. Однако этой методике свойственен ряд недостатков связанных с появлением шума децимации и погрешности интерполяции. Более того, процесс децимации ИХ фильтра синтезированной в системе MATLAB не целесообразен еще и потому, что каждая дискрета ИХ оптимизирована. В связи с чем, при децимации ИХ наблюдается рост неравномерности АЧХ. В [28] предлагается другая методика синтеза узкополосных КИХ-фильтров на основе двухкаскадной и многокаскадной структур цифровых гребенчатых фильтров. Хотя многокаскадная реализация имеет большую степень эффективности, по сравнению с двухкаскадной реализацией, неравномерность АЧХ в полосе пропускания, при такой структуре, пропорциональна числу каскадов, что не всегда приемлемо. Поэтому в тех случаях, где есть запас по быстродействию, целесообразно воспользоваться двухкаскад-

ной структурой, которая наряду с высокой эффективностью по сравнению с некаскадной реализацией НЧ-фильтра, позволяет не только исключить погрешности дедимации и интерполяции, но и существенно уменьшить уровень дисперсии собственного шума.

**Методика.** Рассмотрим метод проектирования узкополосных КИХ-фильтров с помощью пакета Signal Processing Toolbox системы MATLAB [29], основанный на двухкаскадной реализации [28]. Метод рассчитан на проектирование фильтров низких частот (ФНЧ) с малой (относительно частоты дискретизации  $f_d$ ) граничной частотой полосы пропускания. Расчет фильтра состоит из нескольких этапов.

1. Задаются параметры исходного фильтра: относительные граничные частоты пропускания ( $f_p$ ) и заграждения ( $f_s$ ), соответствующие им уровни АЧХ  $H(f_p)$  и  $H(f_s)$ , а также характер неравномерности АЧХ (максимально плоская или с равноволновыми пульсациями). При этом считается, что АЧХ идеального фильтра в полосе пропускания равна единице.

2. По известным относительным частотам рассчитывается коэффициент  $L$  в первом приближении по формуле:

$$L \approx \frac{1}{f_s + f_p + \sqrt{f_s - f_p}}$$

3. Рассчитываются коэффициенты структуры первого ФНЧ (ФНЧ<sub>1</sub>) для параметров:

$$f_{p1} = f_p \cdot L; f_{s1} = f_s \cdot L; H_1(f_{p1}) = \sqrt{H(f_p)}; H_2(f_{s1}) = H(f_s).$$

4. Аналогичным образом рассчитываются коэффициенты структуры второго ФНЧ (ФНЧ<sub>2</sub>) для параметров:

$$f_{p2} = f_p; f_{s2} = 1/L - f_s; H_2(f_{p2}) = \sqrt{H(f_p)}; H_2(f_{s2}) = H(f_s).$$

5. Искомый фильтр получается каскадным соединением ФНЧ<sub>1</sub> и ФНЧ<sub>2</sub>. В ФНЧ<sub>1</sub> все задержки увеличиваются в  $L$  раз, т. е. разностное уравнение преобразованного ФНЧ<sub>1</sub> будет:

$$y_n = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot x_{n-mL},$$

где  $M$  – порядок (длина КИХ) исходного ФНЧ<sub>1</sub>,  $a_m$  – его коэффициенты,  $x_n$  – входной,  $y_n$  – выходной сигналы.

Полученный фильтр имеет примерно  $M_1 + M_2$  сложений и умножений на отсчет сигнала, где  $M_1$  – порядок ФНЧ<sub>1</sub>,  $M_2$  – порядок ФНЧ<sub>2</sub>. Выигрыш по числу операций на отсчет сигнала в сравнении с традиционным нерекурсивным фильтром будет примерно в  $M / (M_1 + M_2)$  раз, где  $M$  – порядок ФНЧ, реализованного по некаскадной структуре.

В результате увеличения длины конечной импульсной характеристики ФНЧ<sub>1</sub> его АЧХ сжимается по оси частот в  $L$  раз, в результате чего фильтр становится гребенчатым (рис. 7). Полученный фильтр при  $0 \leq f / f_d \leq 0.5$  имеет  $L$  полос пропускания при четном  $L$  и  $L - 1$  – при нечетном. При этом крутизна АЧХ в переходной полосе будет такой же, как и у исходного фильтра. АЧХ ФНЧ<sub>2</sub> имеет меньшую крутизну в переходной полосе, но его АЧХ не является гребенчатой (рис.8) при  $0 \leq f / f_d \leq 0.5$ . Таким образом ФНЧ<sub>1</sub> обеспечивает нужную крутизну АЧХ при в  $L$  раз меньшем числе операций по сравнению с традиционной реализацией, а ФНЧ<sub>2</sub> подавляет дополнительные полосы при невысокой крутизне пере-

ходной полосы, а значит и небольшом числе операций. В результате каскадного соединения ФНЧ<sub>1</sub> и ФНЧ<sub>2</sub> их АЧХ перемножаются, и получается АЧХ фильтра нижних частот с крутым спадом в переходной полосе (рис. 9).

Дополнительно отметим, что так как, собственный шум на выходе двухкаскадной структуры будет определяться в основном составляющей выходного каскада, то в качестве такового целесообразней использовать ФНЧ<sub>1</sub>.

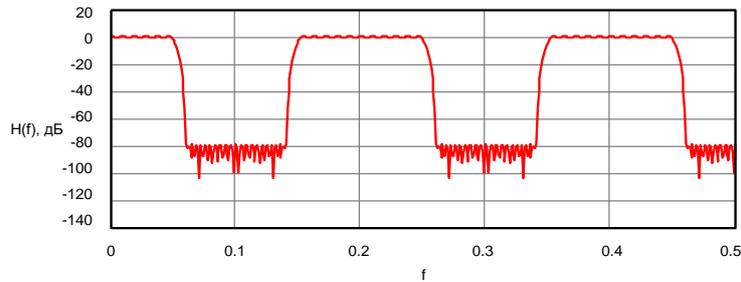


Рис. 7. АЧХ ФНЧ<sub>1</sub>, полученного в результате увеличения всех задержек структуры фильтра в L раз

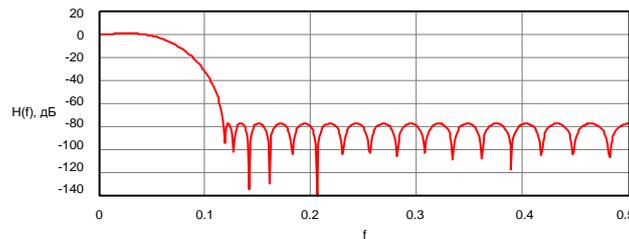


Рис. 8. АЧХ ФНЧ<sub>2</sub>, с относительно небольшой крутизной в переходной полосе

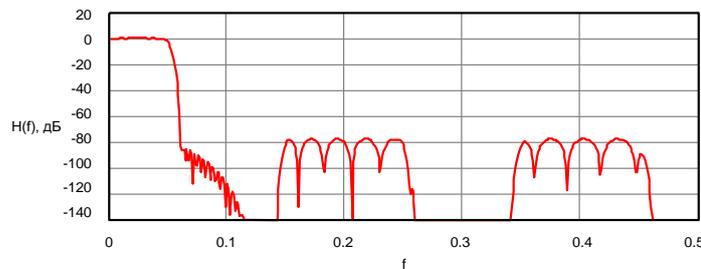


Рис. 9. АЧХ фильтра, полученного в результате каскадного включения ФНЧ<sub>1</sub> и ФНЧ<sub>2</sub>

Уровень АЧХ на границе полосы пропускания искомого фильтра будет равен  $H_1(f_{p1}) \cdot H_2(f_{p2}) = \sqrt{H(f_p)} \cdot \sqrt{H(f_p)} = H(f_p)$ , т.е. будет соответствовать заданному уровню.

**Примеры.** С помощью данной методики были рассчитаны фильтры со следующими параметрами:

- 1)  $f_p = 0,02$ ;  $f_s = 0,04$ ;  $H(f_p) = -1$ дБ;  $H(f_s) = -80$ дБ,  $M = 253$ .
- 2)  $f_p = 0,01$ ;  $f_s = 0,02$ ;  $H(f_p) = -1$ дБ;  $H(f_s) = -80$ дБ,  $M = 506$ .
- 3)  $f_p = 0,01$ ;  $f_s = 0,015$ ;  $H(f_p) = -1$ дБ;  $H(f_s) = -80$ дБ,  $M = 1012$ .

В случае применения предлагаемой методики выигрыш по числу операций в сравнении с традиционным нерекурсивным фильтром составил:

- ◆ в первом случае в  $k_1 = 2,91$  раза;
- ◆ во втором случае в  $k_2 = 4,34$  раза;
- ◆ в третьем случае в  $k_3 = 6$  раз.

**Заключение.** Стоимость цифровых КИХ фильтров увеличивается с уменьшением полосы пропускания ФНЧ (частоты его среза). Основными идеями этих методов являются интерполяция и перемножение АЧХ.

Полученный фильтр имеет сильно прореженные коэффициенты, что в сумме с коэффициентами интерполирующего фильтра дает низкую вычислительную сложность, гораздо меньшую, чем при прямой реализации цифрового ФНЧ. Перемножение АЧХ подавляет паразитные полосы, порождаемые прореживанием КИХ (децимацией). Также в данной статье предложена структурная схема КИХ фильтра с МЧХ, а также процедура проектирования.

Метод проектирования узкополосных КИХ-фильтров в системе MATLAB, позволяет существенно упростить процесс синтеза двухкаскадной структуры цифровых фильтров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wei Y. and Lian Y.* A Computationally Efficient Non-Uniform Digital Filter Bank for Hearing Aid // IEEE International Workshop on Biomedical Circuits and Systems. – Dec. 2004. – P. S1.3.INV-17-20.
2. *Hamida A.B.* Implication of new technologies in deafness healthcare: deafness rehabilitation using prospective design of hearing aid systems // IEEE International Symposium on Technology and Society. – Sept. 2000. – P. 85-90.
3. *McAllister H.G., Black N.D., Waterman N. and Li M.* Audiogram matching using frequency sampling filters // Proceedings of the 16th IEEE Annual International Conference on Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. – Nov. 1994. – Vol. 1. – P. 249-250.
4. *Витязев В.В.* Методы цифровой частотной селекции и оптимальное проектирование полосовых фильтров на процессорах обработки сигналов: дисс. ... д-ра техн. наук: 06.12.1996. – Рязань, 1994. – 340 с.
5. *Onat E., Ahmadi M., Jullien G.A. and Miller W.C.* Optimized delay characteristics for a hearing instrument filter bank // Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. – Aug. 2000. – Vol. 3. – P. 1074-1077.
6. *Турулин И.И.* Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
7. *Турулин И.И., Верич Ю.Б.* Применение системы MATLAB для синтеза узкополосных нерекурсивных фильтров // Цифровая обработка сигналов. – 2003. – № 3. – С. 44-45.
8. *Бородянский И.М., Турулин И.И.* Применение рекурсивных КИХ-фильтров для подавления помех при автоматическом контроле сопротивления изоляции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 10. – С. 99-110.
9. *Верич Ю.Б.* Методика синтеза узкополосных КИХ-фильтров в системе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2004. – № 2 (37). – С. 134-136.
10. *Турулин И.И.* Управляемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 308 с.
11. *Rosenbaum L., Lowenborg P. and Johansson M.* Cosine and sine modulated FIR filter banks utilizing the frequency-response masking approach // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – May 2003. – Vol. 3. – P. 882-885.
12. *Ching-Shun Lin, Yong Ching Lim, Bregovic R. and Saramaki T.* Frequency response masking based design of two-channel FIR filterbanks with rational sampling factors and reduced implementation complexity // Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. – Sept. 2005. – P. 121-126,

13. *Lee Jun Wei and Lim Y.C.* Designing the fast filter bank with a minimum complexity criterion // *IEEE Seventh International Symposium on Signal Processing and Its Applications*. – July 2003. – Vol. 2. – P. 279-282.
14. *Lim Y.C. and Jun Wei Lee.* Matrix formulation: fast filter bank // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – May 2004. – Vol. 5. – P. 133-136.
15. *Esteban D. and Galand C.* Application of quadrature mirror filters to split band voice coding schemes // *IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – May 1977. – P. 191-195.
16. *Krishna A.V. and Hari K.V.S.* Filter Bank precoding for FIR equalization in high-rate MIMO communications // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – May 2006. – Vol. 54, Issue 5. – P. 1645-1652.
17. *Jalil A.M., Amindavar H. and Almasganj F.* Subband blind equalization using wavelet filter banks // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. – May 2005. – Vol. 6. – P. 5730-5733.
18. *Onat E., Ahmadi M., Jullien G.A. and Miller W.C.* Optimized delay characteristics for a hearing instrument filter bank // *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*. – Aug. 2000. – Vol. 3. – P. 1074-1077.
19. *Wei Y. and Lian Y.* A Computationally Efficient Non-Uniform Digital Filter Bank for Hearing Aid // *IEEE International Workshop on Biomedical Circuits and Systems*. – Dec. 2004. – P. S1.3.INV-17-20.
20. *Lim Y.C.* A digital filter bank for digital audio systems // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. – Aug 1986. – Vol. 3. – P. 848-849.
21. *Robert E. Sandlin.* Text book of hearing aid amplification. – Singular Publishing Group, 2000.
22. *Kaplan T., Cruz-Albrecht J., Mokhtari M., Matthews D., Jensen J. and Chang M.F.* 1.3-GHz IF digitizer using a 4th-order continuous-time bandpass modulator // *IEEE Proc. Custom Int.Circ. Conference*. – Sept. 2003. – P. 127-130.
23. *Chandrasekaan R., Lian Y. and Rana R.S.* A High-Speed Low-Power D Flip-Flop // *The 6th International Conference on ASIC (2005)*. – Oct. 2005. – Vol. 1. – P. 82-85.
24. *Gustafsson O., Johansson H. and Wanhammar L.* Design and efficient implementation of high-speed narrow-band recursive digital filters using single filter frequency masking techniques // *Proc. of IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* – May 2000. – Vol. 3. – P. 359-362.
25. *Gustafsson O., Johansson H., and Wanhammar L.* Narrow-band and wideband single filter frequency masking FIR filters // *Proc. of IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* – May 2001. – Vol. 2. – P. 181-184.
26. *Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н.* Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
27. *Крошьер Р.Е., Рабинер Л.Р.* Интерполяция и децимация цифровых сигналов. Методический обзор // *ТИИЭР*. – 1981. – Т. 69, № 3. – С. 14-49.
28. *Волков В.В.* Цифровая частотная селекция сигналов. – М.: Радио и связь, 1993. – 238 с.
29. *Рудаков П.И., Сафонов В.И.* Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 416 с.

#### REFERENCES

1. *Wei Y. and Lian Y.* A Computationally Efficient Non-Uniform Digital Filter Bank for Hearing Aid, *IEEE International Workshop on Biomedical Circuits and Systems*, Dec. 2004, pp. S1.3.INV-17-20.
2. *Hamida A.B.* Implication of new technologies in deafness healthcare: deafness rehabilitation using prospective design of hearing aid systems, *IEEE International Symposium on Technology and Society*, Sept. 2000, pp. 85-90.
3. *McAllister H.G., Black N.D., Waterman N. and Li M.* Audiogram matching using frequency sampling filters, *Proceedings of the 16th IEEE Annual International Conference on Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers*, Nov. 1994, Vol. 1, pp. 249-250.
4. *Vityazev V.V.* Metody tsifrovoy chastotnoy seleksii i optimal'noe proektirovanie polosovyykh fil'trov na protsessorakh obrabotki signalov: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of digital frequency selection and optimal design of bandpass filters on signal processing processors: dr. of eng. sc. diss.]: 06.12.1996. Ryazan', 1994, 340 p.

5. Onat E., Ahmadi M., Jullien G.A. and Miller W.C. Optimized delay characteristics for a hearing instrument filter bank, *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Aug. 2000, Vol. 3, pp. 1074-1077.
6. Turulin I.I. Osnovy teorii rekursivnykh KIKH-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
7. Turulin I.I., Verich Yu.B. Primenenie sistemy MATLAB dlya sinteza uzkopolosnykh nerekursivnykh fil'trov [Application of the MATLAB system for the synthesis of narrow-band non-recursive filters], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2003, No. 3, pp. 44-45.
8. Borodyanskiy I.M., Turulin I.I. Primenenie rekursivnykh KIKh-fil'trov dlya podavleniya pomekh pri avtomaticheskoy kontrolye soprotivleniya izolyatsii [The use of recursive FIR filters for noise suppression during automatic control of insulation resistance], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10, pp. 99-110.
9. Verich Yu.B. Metodika sinteza uzkopolosnykh KIKh-fil'trov v sisteme [The method of synthesizing narrow-band QUI-filters in the system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2004, No. 2 (37), pp. 134-136.
10. Turulin I.I. Upravlyaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Controlled digital filters: a monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 308 p.
11. Rosenbaum L., Lowenborg P. and Johansson M. Cosine and sine modulated FIR filter banks utilizing the frequency-response masking approach, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2003, Vol. 3, pp. 882-885.
12. Ching-Shun Lin, Yong Ching Lim, Bregovic R. and Saramaki T. Frequency response masking based design of two-channel FIR filterbanks with rational sampling factors and reduced implementation complexity, *Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Sept. 2005, pp. 121-126.
13. Lee Jun Wei and Lim Y.C. Designing the fast filter bank with a minimum complexity criterion, *IEEE Seventh International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, July 2003, Vol. 2, pp. 279-282.
14. Lim Y.C. and Jun Wei Lee. Matrix formulation: fast filter bank, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 2004, Vol. 5, pp. 133-136.
15. Esteban D. and Galand C. Application of quadrature mirror filters to split band voice coding schemes, *IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 1977, pp. 191-195.
16. Krishna A.V. and Hari K.V.S. Filter Bank precoding for FIR equalization in high-rate MIMO communications, *IEEE Transactions on Signal Processing*, May 2006, Vol. 54, Issue 5, pp. 1645-1652.
17. Jalil A.M., Amindavar H. and Almasganj F. Subband blind equalization using wavelet filter banks, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2005, Vol. 6, pp. 5730-5733.
18. Onat E., Ahmadi M., Jullien G.A. and Miller W.C. Optimized delay characteristics for a hearing instrument filter bank, *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Aug. 2000, Vol. 3, pp. 1074-1077.
19. Wei Y. and Lian Y. A Computationally Efficient Non-Uniform Digital Filter Bank for Hearing Aid, *IEEE International Workshop on Biomedical Circuits and Systems*, Dec. 2004, pp. S1.3.INV-17-20.
20. Lim Y.C. A digital filter bank for digital audio systems, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Aug 1986, Vol. 3, pp. 848-849.
21. Robert E. Sandlin. Text book of hearing aid amplification. Singular Publishing Group, 2000.
22. Kaplan T., Cruz-Albrecht J., Mokhtari M., Matthews D., Jensen J. and Chang M.F. 1.3-GHz IF digitizer using a 4th-order continuous-time bandpass modulator, *IEEE Proc. Custom Int.Circ. Conference*, Sept. 2003, pp. 127-130.
23. Chandrasekan R., Lian Y. and Rana R.S. A High-Speed Low-Power D Flip-Flop, *The 6th International Conference on ASIC (2005)*, Oct. 2005, Vol. 1, pp. 82-85.
24. Gustafsson O., Johansson H. and Wanhammar L. Design and efficient implementation of high-speed narrow-band recursive digital filters using single filter frequency masking techniques, *Proc. of IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, May 2000, Vol. 3, pp. 359-362.
25. Gustafsson O., Johansson H., and Wanhammar L. Narrow-band and wideband single filter frequency masking FIR filters, *Proc. of IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, May 2001, Vol. 2, pp. 181-184.

26. *Gol'denberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 256 p.
27. *Krosh'er R.E., Rabiner L.R.* Interpolyatsiya i detsimatsiya tsifrovykh signalov. Metodicheskiy obzor [Interpolation and decimation of digital signals. Methodical review], *TIER* [ТИЕР], 1981, Vol. 69, No. 3, pp. 14-49.
28. *Volkov V.V.* Tsifrovaya chastotnaya selektsiya signalov [Digital frequency selection of signals]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 238 p.
29. *Rudakov P.I., Safonov V.I.* Obrabotka signalov i izobrazheniy. MATLAB 5.x [Signal and image processing. MATLAB 5.x]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2000, 416 p.

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

**Гужва Дмитрий Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054571975; аспирант.

**Север Константин Олегович** – e-mail: remales@mail.ru; тел.: +79885467923; аспирант.

**Морозов Андрей Алексеевич** – e-mail: morozov@sfedu.ru; тел.: +79034538971; аспирант.

**Guzhva Dmitriy Alexandrovich** – Southern Federal University; e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; Taganrog, Russia; phone: +79054571975; graduate student.

**Sever Constantine Olegovich** – e-mail: remales@mail.ru; phone: +79885467923; graduate student.

**Morozov Andrey Alekseevich** – e-mail: morozov@sfedu.ru; phone: +79034538971; graduate student.

## Раздел II. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-114-121

**Ю.М. Богданов, А.Н. Зикий, А.И. Пустовалов**

### **АТТЕНЮАТОР С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ МОДУЛЯ М44752**

*Аттенюаторы широко используются в радиоприемных устройствах для расширения динамического диапазона входных сигналов, а также для управления выходной мощностью радиопередатчиков. В последнее время аттенюаторы массово используются в приемопередающих модулях активных антенных решеток. Аттенюаторы различаются по диапазону рабочих частот, элементной базе, методу управления, рабочей мощности. Актуальной задачей является создание и исследование новых микросхем аттенюаторов с цифровым управлением отечественного производства. Целью данной работы является экспериментальное исследование основных параметров и характеристик цифрового аттенюатора дециметрового диапазона волн. Объектом исследования является аттенюатор типа М44752 производства АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», установленный на тест-плате. Представлены результаты экспериментального исследования в диапазоне рабочих частот от 0,1 до 2 ГГц. Даны схема включения, фото макета и шесть амплитудно-частотных характеристик для разных управляющих кодов. Достигнуты следующие электрические параметры: – диапазон рабочих частот от 0,1 до 2 ГГц; – диапазон затуханий от 1 до 50 дБ; – допустимая входная мощность не более 23 дБм; – число разрядов управления 6; – время переключения не более 50 нс; – КСВН входа и выхода не более 2. Полученные результаты исследования модуля М44752 могут быть использованы в сверхширокополосной приемопередающей аппаратуре связи различного назначения, навигации и радиолокации. Актуальность исследования подтверждается двумя современными тенденциями – микроминиатюризацией радиоэлектронной аппаратуры и импортозамещением.*

*СВЧ аттенюатор с цифровым управлением; диапазон частот; сверхширокополосный; эксперимент; амплитудно-частотная характеристика; код управления.*

**Yu.M. Bogdanov, A.N. Zikiy, A.I. Pustovalov**

### **ATTENUATOR WITH DIGITAL CONTROL BASED ON THE M44752 MODULE**

*Attenuators are often used in radio receivers to expand the dynamic range of input signals, as well as to control the output power of radio transmitters. Recently, attenuators are used in transceiver modules of active antenna arrays. Attenuators differ in operating frequency range, base of elements, control method, operating power. An urgent task is the creation and research of new microcircuits of attenuators with digital control of domestic production. The purpose of this work is an experimental research of the main parameters and characteristics of a digital attenuator of the decimeter wave range. The object of the study is an attenuator of the M44752 type installed on the test board. It is manufactured by JSC "SPE "Istok" named after A.I. Shokin". The results of the experimental research are given in the operating frequency range from 0.1 to 2 GHz. There are a switching circuit, a photo of a model and six amplitude-frequency characteristics for different control codes. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency range is from 0.1 to 2 GHz; – attenuation range is from 1 to 50 dB; – permissible input*

power is not more than 23 dBm; – the number of control bits is 6; – switching time is not more than 50 ns;– VSWR of input and output is not more than 2. The obtained results of the study of the M44752 module can be used in ultra-wideband transceiver communication equipment for various purposes, navigation and radiolocation. The relevance of the research is confirmed by two current trends – microminiaturization of electronic equipment and import substitution.

Microwave attenuator with digital control; frequency range; ultra-wideband; experiment; amplitude-frequency characteristic; control code.

**Введение.** Аттенуаторы нашли широкое применение в приемо-передающей и измерительной аппаратуре. Наиболее массово аттенуаторы применяют в приемо-передающих модулях фазированных антенных решеток. Предприятиями отечественной и зарубежной промышленности выпускается большое количество типов аттенуаторов, отличающихся элементной базой, диапазоном рабочих частот, рассеиваемой мощностью, способом управления.

Микросхемы цифровых ступенчатых аттенуаторов изготавливают фирмы Analog Devices, M/A-COM, Qorvo, Peregrine Semiconductor, Mini-Circuits, Honeywell и другие фирмы США.

По управляемым аттенуаторам опубликовано значительное число работ, в том числе монографии [1–3], учебные пособия [4, 5], статьи [6–13], реклама [14–15], диссертации [16–20].

Объектом исследования в данной работе является серийный аттенуатор типа M44752 АПНТ.434820.054ТУ производства АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», полученный от производителя в составе тест-платы.

Целью работы является анализ основных характеристик изделия, выявление особенностей его применения. Аналогом исследуемого аттенуатора является микросхема AT-263 производства фирмы M/A-COM [15].

К аттенуатору предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 10 до 2000 МГц;
- ◆ диапазон затуханий от 1 до 50 дБ (относительно начального затухания);
- ◆ допустимая входная мощность не более 23 дБм;
- ◆ число разрядов управления 6;
- ◆ время переключения не более 50 нс;
- ◆ КСВН входа и выхода не более 2.

**Схема и конструкция.** Схема включения аттенуатора приведена на рис. 1. Аттенуатор содержит модуль M44752, два соединителя типа SMA, резисторы и конденсаторы. Разделительные конденсаторы C1 и C4 предотвращают попадание внешних напряжений в цепи радиочастотной части аттенуатора. Блокировочные конденсаторы C2 и C3 позволяют уменьшить пульсации питающего напряжения.

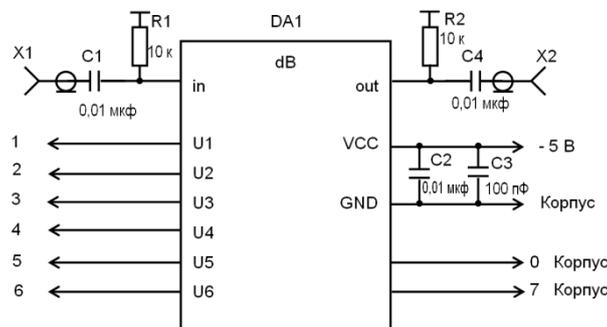


Рис. 1. Схема включения аттенуатора

Аттенюатор смонтирован на печатной плате из фольгированного диэлектрика размером  $55 \times 40 \times 1,5$  мм. Кроме собственных цепей аттенюатора, плата содержит тестовый отрезок копланарной линии передачи. Фото платы аттенюатора показано на рис. 2. Плата имеет антикоррозийное покрытие золотом и множество заземляющих металлизированных отверстий вдоль копланарной линии передачи. Тестовый отрезок копланарной линии передачи позволяет уточнить собственные потери микросхемы.

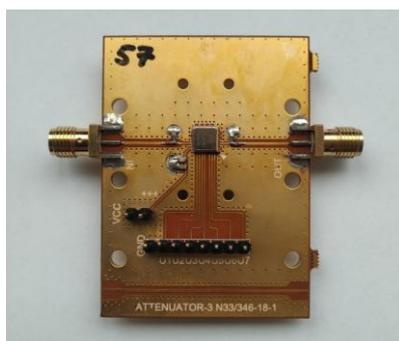


Рис. 2. Фото платы аттенюатора с установленным модулем M44752

**Эксперимент.** Эксперимент проводили на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Основным инструментом для снятия амплитудно-частотных характеристик – векторный анализатор цепей типа PNA-L. В качестве источника питания использован прибор типа GPC-730600. Управляющее напряжение из 6 бит формировалось с помощью вспомогательного оборудования – пульта, содержащего набор тумблеров и гнезд.

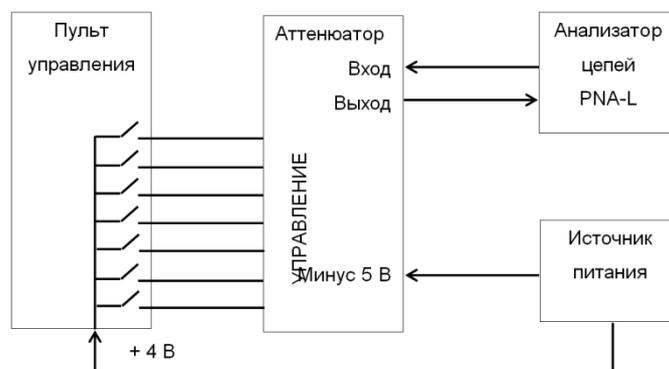


Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте на управляющие входы аттенюатора поданы все нули. При этом амплитудно-частотная характеристика показывает затухание не более 2,6 дБ (кривая 0 на рис. 4).

Во втором эксперименте на управляющие входы аттенюатора подана комбинация, соответствующая затуханию 10 дБ. В этом случае АЧХ на рис. 4 отмечена цифрой 10.

В третьем эксперименте на управляющие входы аттенюатора подана комбинация, соответствующая затуханию 20 дБ. В этом случае АЧХ на рис. 4 отмечена цифрой 20.

В четвертом, пятом и шестом экспериментах были проведены аналогичные действия. Результирующие АЧХ показаны на рис. 4.

**Значения вносимого ослабления модуля M44752**

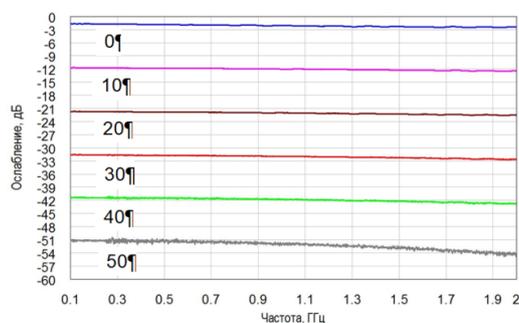


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики аттенюатора для шести комбинаций управляющего кода

Таблица 1

**Значения нормированного вносимого ослабления для шести комбинаций управляющего кода**

Ослабление, дБ	Минимальное значение вносимого ослабления, дБ	Максимальное значение вносимого ослабления, дБ	Нормализованное минимальное значение вносимого ослабления, дБ	Нормализованное максимальное значение вносимого ослабления, дБ	Неравномерность ослабления, дБ
Код управления "0 дБ"	1,67	2,58	0	0	0
Код управления "10 дБ"	11,69	12,54	10,02	9,96	± 0,03
Код управления "20 дБ"	21,69	22,64	20,02	20,06	± 0,02
Код управления "30 дБ"	31,55	32,76	29,88	30,18	± 0,15
Код управления "40 дБ"	41,18	42,95	39,51	40,37	± 0,43
Код управления "50 дБ"	50,46	54,8	48,79	52,22	± 1,72

Ниже в табл. 2 проводится сравнение заданных и достигнутых параметров аттенюатора.

Таблица 2

**Основные параметры аттенюатора М44752**

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Диапазон рабочих частот, МГц	10 - 2000	100 - 2000
Максимальные потери для кода управления "0 дБ", дБ	5	2,58
Максимальные потери для кода управления "10 дБ", дБ	15	12,54
Максимальные потери для кода управления "20 дБ", дБ	25	22,64
Максимальные потери для кода управления "30 дБ", дБ	35	32,76
Максимальные потери для кода управления "40 дБ", дБ	45	42,95
Максимальные потери для кода управления "50 дБ", дБ	55	54,8
Максимальный коэффициент стоячей волны по напряжению	2	< 2

Из табл. 2 видно, что все заданные параметры аттенюатора обеспечиваются.

В табл. 3 приведено сравнение исследованного аттенюатора с аналогом АТ-263, которое показывает преимущество отечественной разработки по диапазону изменения затухания на 19 дБ и неравномерности АЧХ при сравнимых других параметрах.

Таблица 3

**Сравнение параметров аттенюаторов М44752 и АТ-263**

Наименование параметра, размерность	М44752	АТ-263
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,01 - 2	DC - 2
Пределы изменения затухания, дБ	0 - 50	0 - 31
Шаг установки затухания, дБ	1	1
Время переключения, нс, не более	50	40
Число разрядов управления	6	5
Неравномерность АЧХ, дБ, в пределах 0-31 дБ	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$

**Заключение:**

1. Проведено экспериментальное исследование аттенюатора дециметрового диапазона волн с цифровым управлением. Показано достижение высоких электрических параметров, сопоставимых с зарубежным аналогом типа АТ-263 фирмы М/А-СОМ.

2. Исследованный аттенюатор рекомендуется использовать в приёмно-передающей и измерительной аппаратуре.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сверхширокополосные микроволновые устройства. / под ред. А.П. Креницкого и В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 2001. – 560 с.
2. Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В. СВЧ электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. В 2<sup>х</sup> кн. Кн. 2. – М.: Техносфера, 2016. – 728 с.
3. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и НВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
4. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Устройства формирования сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 113 с.
5. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
6. Дьяконов В.П. Монолитные СВЧ-микросхемы аттенуаторов и усилителей компании Hitite Microwave // Компоненты и технологии. – 2012. – № 2.
7. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Горбатенко О.А. Экспериментальное исследование ступенчатого аттенуатора // Матер. 1 Всероссийской научно-практической конференции: "Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения". – Курск, ЮЗГУ, 2014. – С. 39-42.
8. Абакумова Н.В., Богданов Ю.М., Балыко А.К. и др. Схемы СВЧ аттенуаторов на полевых транзисторах с барьером Шоттки // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 79-87.
9. Зикий А.Н., Власенко Д.В. Аттенуатор миллиметрового диапазона // Матер. 4 международной научной конференции "Современные проблемы радиоэлектроники". – Ростов-на-Дону: ЮРГУЭС, 2012. – С. 315-318.
10. Карпов Ю. Отечественные электрически управляемые СВЧ-аттенуаторы // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8.
11. Белов Л.А. Аттенуаторы СВЧ сигналов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2006. – № 2.
12. Очеретянюк И. СВЧ-аттенуаторы фирмы Herley General Microwave с аналоговым и цифровым управлением // Современная электроника. – 2007. – № 1.
13. Баров А.А., Кондратенко А.В., Хохол Д.С. GaAs МИС управляемого СВЧ-аттенуатора диапазона 0–20 ГГц // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2010. – № 2 (22). Ч. 2. – С. 187-189.
14. Digital Attenuator HMC939A Data Scheet. Analog Devices. – 6 p.
15. Digital Attenuator AT-263. Data Scheet. M/A-COM Technology Solutions Inc. – 5 p. – www.macomtech.com.
16. Талышев Н.В. Синтез дискретных аттенуаторов проходного типа при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж: Воронежский институт МВД РФ, 2000. – 16 с.
17. Чижов А.И. Аналитические методы расчета и структурного анализа СВЧ устройств на основе теории цепей: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Нижний Новгород, НГТУ, 2011. – 17 с.
18. Федоров В.Н. Исследование волновых процессов в связанных полосковых линиях и разработка на их основе быстродействующих аттенуаторов и динамических корректоров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 1999. – 24 с.
19. Рубанович М.Г. Сверхширокополосные поглощающие устройства высокого уровня мощности: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2015.
20. Малышев А.В. Автоматизация и управление процессом производства пленочных аттенуаторов и резисторов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: СЗГТУ, 2001.

## REFERENCES

1. Sverkhshirokopolosnye mikrovolnovye ustroystva. [Ultra-wideband microwave devices], ed. by A.P. Krenitskogo i V.P. Meshchanova. Moscow.: Radio i svyaz', 2001, 560 p.
2. Belous A.I., Merdanov M.K., Shvedov S.V. SVCh elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi. Tekhnicheskaya entsiklopediya [Microwave electronics in radar and communication systems. Technical encyclopedia]. In 2 2 books. Book 2. Moscow: Tekhnosfera, 2016, 728 p.
3. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i NVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and NVH radio measuring equipment. Nodal and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
4. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Ustroystva formirovaniya signalov s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty: ucheb. posobie [Devices for generating signals with pseudorandom adjustment of the operating frequency: textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 113 p.

5. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for generating microwave signals and their components: a textbook]. Moscow: Izd. dom MEI, 2010, 320 p.
6. *D'yakonov V.P.* Monolitnye SVCh-mikroskhemy attenuatorov i usiliteley kompanii Hittite Microwave [Monolithic microwave chips of attenuators and amplifiers of the Hittite Microwave company], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2012, No. 2.
7. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Gorbatenko O.A.* Eksperimental'noe issledovanie stupenchatogo attenuatora [Experimental study of a step attenuator] *Mater. 1 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: "Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyanie, problemy i puti reshe-niya»* [Materials of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference: "Infocommunications and information security: state, problems and solutions"]. Kursk, YuZGU, 2014, pp. 39-42.
8. *Abakumova N.V., Bogdanov Yu.M., Balyko A.K. i dr.* Skhemy SVCh attenuatorov na polevykh tranzistorakh s bar'ером SHottki [Schemes of microwave attenuators on field-effect transistors with a Schottky barrier], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2007, No. 3, pp. 79-87.
9. *Zikiy A.N., Vlasenko D.V.* Attenuator millimetrovogo diapazona [Attenuator of the millimeter range], *Mater. 4 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Sovremennyye problemy radioelektroniki"* [Materials of the 4th international scientific conference "Modern problems of radio electronics"]. Rostov-on-Don: YuRGUES, 2012, pp. 315-318.
10. *Karpov Yu.* Otechestvennyye elektricheski upravlyaemye SVCh-attenuatory [Domestic electrically controlled microwave attenuators], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2007, No. 8.
11. *Belov L.A.* Attenuatory SVCh signalov [Attenuators of microwave signals], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2006, No. 2.
12. *Ocheretyanko I.* SVCh-attenuatory firmy Herley General Microwave s analogovym i tsifrovym upravleniem [Herley General Microwave microwave attenuators with analog and digital control], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2007, No. 1.
13. *Barov A.A., Kondratenko A.V., Khokhol D.S.* GaAs MIS upravlyaemogo SVCh-attenuatora diapazona 0–20 GGts [GaAs MIS controlled microwave attenuator range 0-20 GHz], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], Dekabr' 2010, No. 2 (22), Part 2, pp. 187-189.
14. Digital Attenuator HMC939A Data Scheet. Analog Devices, 6 p.
15. Digital Attenuator AT-263. Data Scheet. M/A-COM Technology Solutions Inc., 5 p. [www.macomtech.com](http://www.macomtech.com).
16. *Talyshev N.V.* Sintez diskretnykh attenuatorov prokhodnogo tipa pri proizvol'nykh immitansakh istochnika signala i nagruzki: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Synthesis of discrete attenuators of the pass-through type at arbitrary immitances of the signal source and load: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD RF. 2000, 16 p.
17. *Chizhov A.I.* Analiticheskie metody rascheta i strukturnogo analiza SVCh ustroystv na osnove teorii tsepey: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Analytical methods of calculation and structural analysis of microwave devices based on the theory of circuits: abstract, dr. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod, NGTU, 2011, 17 p.
18. *Fedorov V.N.* Issledovanie volnovykh protsessov v svyazannykh poloskovykh liniyakh i razrabotka na ikh osnove bystrodeystvuyushchikh attenuatorov i dinamicheskikh korrektorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [The study of wave processes in coupled strip lines and the development of high-speed attenuators and dynamic correctors based on them: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk: TUSUR, 1999, 24 p.
19. *Rubanovich M.G.* Sverkhshirokopolosnye pogloshchayushchie ustroystva vysokogo urovnya moshchnosti: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Ultra-wideband high-power absorbing devices: abstract, dr. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk: NGTU, 2015.
20. *Malyshev A.V.* Avtomatizatsiya i upravlenie protsessom proizvodstva plenochnykh attenuatorov i rezistorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Automation and control of the production process of film attenuators and resistors: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg: SZGTU, 2001.

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

**Богданов Юрий Михайлович** – АО "НПП "Исток" им. Шокина"; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Фрязино, Россия; начальник отдела.

**Зикий Анатолий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

**Пустовалов Алексей Иванович** – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: [pustovalov@yahoo.com](mailto:pustovalov@yahoo.com); г. Таганрог, Россия; начальник лаборатории.

**Bogdanov Jurij Mihajlovich** – JSC "RPC "Istok" named after Shokin"; e-mail: zikiy50@mail.ru; Fryazino, Russia; department head.

**Zikiy Aatoliy Nikolaecich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; assistant professor.

**Pustovalov Aleksej Ivanovich** – АО «ТНИИС»; e-mail: [pustovalov@yahoo.com](mailto:pustovalov@yahoo.com); Taganrog, Russia; laboratory head.

УДК 621.3.049.7

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-121-127

**Е.Ю. Гусев, А.В. Сарыев**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ МАЛОИНВАЗИВНОГО НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА**

*Микрозонды стали важным инструментом исследования нейронной активности. Исследования и разработки в области инвазивных нейроинтерфейсов направлены на снижение характерного повреждения нервной ткани за счет уменьшения диаметра имплантируемых зондов менее 100 мкм. Подобные структуры изготавливают методами микрообработки, в частности различными видами анизотропного травления. При этом на размеры и форму зонда оказывают влияние условия травления. Последние должны учитываться на этапе проектирования конструкции зонда. В работе проведена оценка диапазонов геометрических параметров кремниевого микрозонда с учетом условий травления и количества электродов. Аналитические расчеты проводили для структуры зонда, представленной четырьмя областями различной ширины, несущих до семи электродов. Получены зависимости ширины нижнего основания трапецевидного сечения зонда и размера маски от толщины и ширины верхнего основания зонда. Установлены допустимые диапазоны размеров для предложенного варианта четырехуровневого микрозонда; в частности, минимальные значения ширины верхнего основания, составили 17, 28, 39 и 50 мкм, а соответствующие им диапазоны допустимых значений толщин зонда для вариантов с 1 электродом – 30–58 мкм, 2 и 3 электродами – 30–51 мкм, 4 и 5 электродами – 30–43 мкм, а для случая зонда с 6 и 7 электродами – 30–35 мкм. Выполнена оценка величины коррекции размера маски, отражающая влияния условий травления на геометрию зонда.*

*Многоэлектродный микрозонд; анизотропное жидкостное травление; кремний.*

**E.Yu. Gusev, A.V. Saryev**

### **DESIGN OF SILICON MICROPROBE FOR MINIMALLY INVASIVE NEURAL INTERFACE**

*Microprobes have become an important tool in the study of brain activity. Research and development in the field of invasive neurointerfaces is aimed at reducing the characteristic damage to the nervous tissue by reducing the diameter of the implanted probes to less than 100  $\mu\text{m}$ . Such structures are produced by micromachining, in particular, by types of anisotropic etching. In this case, the size and shape of the probe are influenced by the etching conditions. The latter should be*

*taken into account at the designing of the probe. The paper evaluates the ranges of the geometric parameters of a silicon microprobe taking into account the etching conditions and the number of electrodes. Analytical calculations were carried out for the structure of the probe, represented by four regions of different widths, carrying up to seven electrodes. The dependences of bottom base width of a trapezoidal section of the probe and the size of the mask on the thickness and width of the top base are received. The admissible ranges of sizes for the proposed case of the four-level microprobe are established; in particular, the minimum values of the width of the top base were 17, 28, 39 and 50 microns, and the corresponding ranges of permissible values of the probe thickness for cases with 1 electrode – 30–58 microns, 2 and 3 electrodes – 30–51 microns, 4 and 5 electrodes – 30–43 microns, and for the case of a probe with 6 and 7 electrodes – 30–35 microns. The correction value of the mask size is estimated, reflecting the effect of etching conditions on the probe geometry.*

*Multielectrode microprobe; anisotropic wet etching; silicon.*

**Введение.** Нейроинтерфейс – система обмена информации между компьютером и мозгом человека [1, 2]. В зависимости от типа устройства данная технология может быть однонаправленной и двунаправленной [2, 3]. Первый тип позволяет либо считывать сигналы нейронной активности, либо направлять сигналы в мозг. Во втором случае система работает в обоих направлениях одновременно.

В зависимости от воздействия нейроинтерфейсов на мозг их разделяют на три группы: неинвазивные (взаимодействующие только с поверхностью тела) [4], полуинвазивные (взаимодействующие с открытой поверхностью мозга) [5], инвазивные (взаимодействующие непосредственно с корой головного мозга) [6, 7]. Неинвазивные нейроинтерфейсы значительно безопаснее, но им характерна малая пропускная способность сигнала из-за чего повышается вероятность возникновения множественных шумов. Инвазивные, напротив, благодаря контакту с нейронами позволяют передавать сигналы без помех с высоким разрешением. Существенно снизить степень повреждения тканей позволяет использование миниатюрных зондов с размерами поперечного сечения менее 100 мкм [1–4, 8, 9].

Разработано множество методов микрообработки, обеспечивающих изготовление микрозондов с такими размерами [10–12]. Основными методами при этом являются сухое (глубокое реактивное ионное травление) и жидкостное травление. Последнему характерны высокая скорость, точность, а также высокая степень повторяемости [10]. В случае, когда в качестве конструкционного материала микрозонда выступает кремний, для его анизотропного травления традиционно используют водные растворы гидроксида калия (КОН) [13, 14]. При этом на размеры и геометрию микрозонда оказывают влияние условия травления, такие как концентрация и температура раствора [15–17]. Последние должны учитываться на этапе проектирования зонда и разработки комплекта фотошаблонов [11, 12, 18].

Цель работы заключается в установлении диапазонов геометрических параметров кремниевого микрозонда с размером поперечного сечения менее 100 мкм с учетом условий анизотропного жидкостного травления и количества электродов.

**Модель и методика исследования.** Геометрическая форма кремниевого микрозонда определяется природой и условиями проведения анизотропного жидкостного травления. В качестве материалов зонда и маскирующего покрытия (маски) рассматривали КЭФ (100) и оксид кремния ( $\text{SiO}_2$  или  $\text{SiO}_x$ ), соответственно. В результате анизотропного травления структура зонда приобретает вид, показанный на рис. 1.

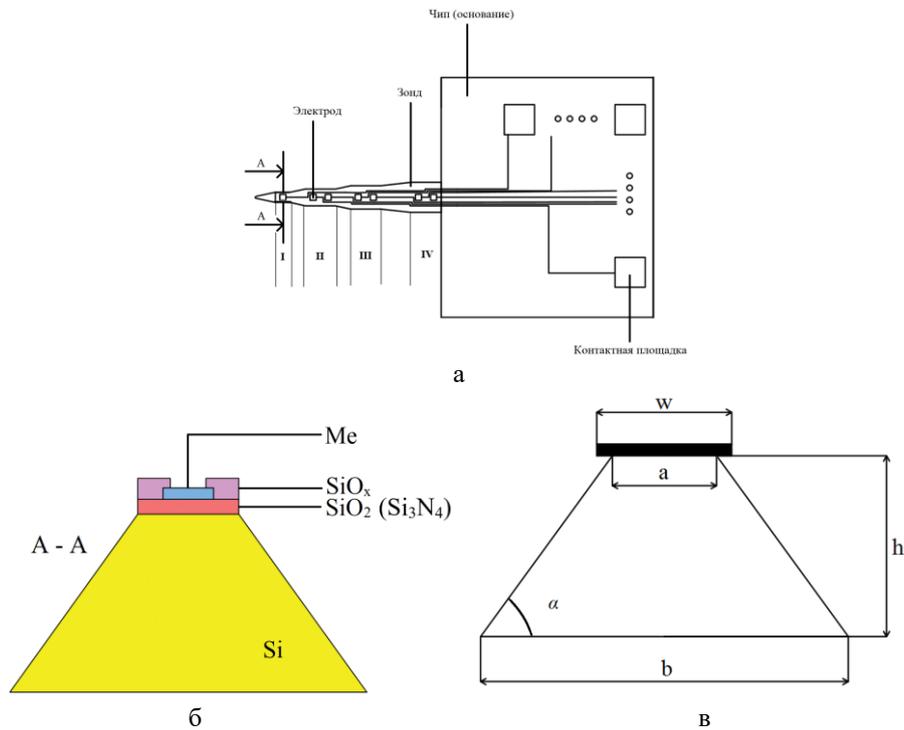


Рис. 1. Структура микрозонда: а – вид сверху, б – поперечное сечение зонда, в – геометрические параметры зонда и маски

Поперечное сечение зонда представляет трапецию с основаниями  $a$  и  $b$ , высотой  $h$  с углом  $\alpha$  между гранями. Верхнее основание трапеции представляет исходную лицевую поверхность подложки кремния с электродами, закрытыми от травления маскирующим покрытием. Положение нижнего основания определяется скоростью и длительностью процесса травления с тыльной стороны подложки. Легко видеть, что размеры трапециевидного зонда связаны следующим соотношением:

$$b = a + 2h \cdot (\tan \alpha)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между гранями (100) и (111) (можно показать, что  $\alpha = 54,74^\circ$  [14]).

Минимальное значение  $a$  зависит от количества электродов, ширины проводящей дорожки, расстояния между дорожками и отступа от края.

$$a_{\min} = 2 \cdot p + w_s + N \cdot (w_o + u), \quad (2)$$

где  $N$  – номер области,  $p$  – отступ от края,  $w_s$  – ширина электрода,  $w_o$  – ширина проводящей дорожки,  $u$  – расстояние между дорожками.

Фактическое значение  $a$  определяется размерами элементов топологического рисунка маски  $w$ , а также величиной подтравки под маску  $(w-a)/2$  (см. рис. 1,в). Учитывая, что конструктивная толщина зонда, обеспечивающая его прочностные характеристики, не может быть меньше 30 мкм [19], а поперечный размер зонда не должен превышать 100 мкм интерес представляет определение допустимых диапазонов геометрических параметров зонда в зависимости от экспериментальных условий анизотропного жидкостного травления. По геометрическим соображениям ширину верхнего основания зонда можно определить следующим образом:

$$a = w - 2 \cdot \left( \frac{R_{[111]}}{R_{[100]}} \cdot \frac{h}{\sin \alpha} \right), \quad (3)$$

где  $R_{[100]}$  и  $R_{[111]}$  – скорости травления в направлении [100] и [111]. Значения скоростей травления в обозначенных направлениях брали из [13, 17].

Зависимости  $b(h)$ ,  $w(h)$  рассчитывали при фиксированных значениях  $a$ , зависимости  $b(a)$ ,  $w(a, R)$  – для ряда  $h$ . Расчеты проводили для структуры зонда, представленной четырьмя областями различной ширины ( $a_I < a_{II} < a_{III} < a_{IV}$  в соответствии с рис. 1,а). В первой области, т.е. области острия, располагается один электрод, в остальных – по два. При этом принято, что  $p = 3,5$  мкм,  $w_s = 10$  мкм,  $w_\partial = 2,5$  мкм, а  $u = 3$  мкм.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Минимальные значения ширины верхнего основания трапецевидного зонда  $a_{\min}$  для областей I-IV составили 17, 28, 39 и 50 мкм, соответственно.

Верхняя граница интервала допустимых значений толщины зонда  $h$ , при которой ширина нижнего основания не превышает 100 мкм, определена в зависимости от  $a_{\min}$ . Так, согласно (1), для зонда с одним электродом диапазон допустимых значений толщины балки ограничен 30–58 мкм. Очевидно, что по мере увеличения количества электродов на зонде, возрастает ширина верхнего основания, и соответственно, ширина нижнего основания зонда. Для зонда с тремя электродами максимально допустимая толщина составила 51 мкм, с пятью электродами – 43 мкм, а для случая зонда с семью электродами – 35 мкм.

По результатам расчетов по (1–3) получены зависимости  $b(h)$ ,  $w(h)$ ,  $b(a)$ ,  $w(a)$ , а также зависимость размера маски от условий травления некоторые из которых показаны на рис. 2.

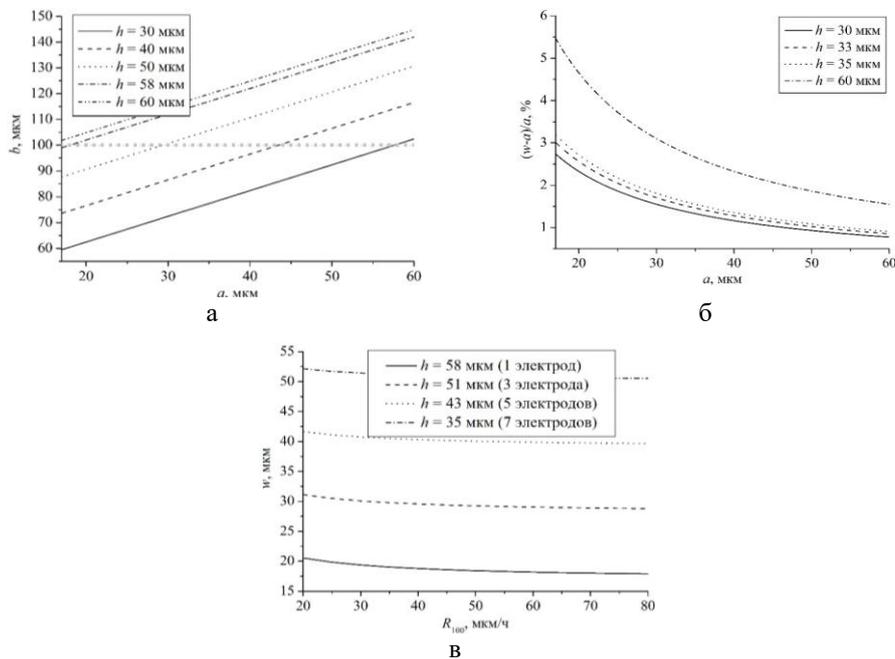


Рис. 2. Зависимости: а – ширины нижнего основания микрозонда от ширины верхнего основания, б – размера маски от ширины верхнего основания, в – размера маски от условий травления

Из рис. 2 видно, что ширина нижнего основания напрямую зависит от ширины верхнего основания и толщины микрозонда (времени травления). Зависимость размера маски от ширины верхнего основания зонда рассчитана для ряда толщин при условии, что скорость анизотропного жидкостного травления кремния в 30 % растворе КОН при 80°C в направлении [100] и [111] примерно равны 79 и 0,5 мкм/ч, соответственно [17].

Принимая во внимание, что толщина зонда определяется только скоростью и временем травления, при определении его геометрии следует учитывать эффект подтравки под маску [20]. Влияние данного эффекта проявляется в виде уменьшения ширины верхнего основания зонда относительно размера маски, и возрастает со временем травления. Кроме того, на геометрические параметры конструкции зонда оказывают влияние условия анизотропного жидкостного травления (см. рис. 2,в). Последние должны быть учтены при разработке топологического рисунка маски в виде соответствующей поправки.

Анализ полученных зависимостей позволил определить диапазоны геометрических размеров четырехуровневого зонда ( $a, b, h$ ), размеров маски  $w$ , подходящие для расположения до семи электродов.

Принимая во внимание, что облик зонда и чипа определяется травлением с лицевой стороны подложки в одном процессе, расчет геометрических размеров чипа (основания) и соответствующей маски следует проводить по выражениям (1-3) при идентичных условиях анизотропного травления (концентрации и температуре раствора).

**Заключение.** В работе установлены диапазоны геометрических параметров четырехуровневого кремниевого микрозонда размерами не более 100 мкм с учетом условий анизотропного жидкостного травления в растворе гидроксида калия и количества электродов. Получены соответствующие зависимости. Выполнена оценка величины коррекции размера маски, отражающая влияния условий травления на размеры зонда.

Для выбранной четырехуровневой структуры микрозонда определены минимальные значения ширины верхнего основания, равные 17, 28, 39 и 50 мкм. Установлены диапазоны допустимых значений толщин зонда – от 30 мкм до 35-58 мкм. При этом значение максимально допустимой толщины для зонда с 1 электродом составило 58 мкм, 2 и 3 электродами – 51 мкм, 4 и 5 электродами – 43 мкм, а для случая зонда с 6 и 7 электродами – 35 мкм. Показано, что на ширину верхнего основания зонда кроме размера маски будут оказывать влияние условия анизотропного жидкостного травления (концентрация раствора и температура). Последние определяют скорости травления кремния по различным кристаллографическим направлениям. Ширина нижнего основания напрямую зависит от ширины верхнего основания и толщины микрозонда (времени травления). Отмеченные особенности необходимо учитывать при проектировании.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке конструкций многоэлектродных кремниевых микрозондов, изготавливаемых методом жидкостного анизотропного травления.

**Благодарности.** Результаты получены с использованием инфраструктуры Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rivnay J., Wang H., Fenno, L. [et al.]. Next-generation probes, particles, and proteins for neural interfacing // Science Advances. – 2017. – Vol. 3 (6). – e1601649.
2. Seymour J.P., Wu F., Wise K.D. [et al.]. State-of-the-art MEMS and microsystem tools for brain research // Microsystems & Nanoengineering. – 2017. – Vol. 3. – 16066.

3. *Obidin N., Tasnim F., Dagdeviren C.* The Future of Neuroimplantable Devices: A Materials Science and Regulatory Perspective // *Advanced Materials*. – 2019. – Vol. 32 (15). – 1901482.
4. *Szostak K.M., Grand L., Constandinou T.G.* Neural Interfaces for Intracortical Recording: Requirements, Fabrication Methods, and Characteristics // *Frontiers in Neuroscience*. – 2017. – Vol. 11. – 665.
5. *Leuthardt E.C., Schalk G., Wolpaw J.R. [et al.]*. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans // *J. Neural Eng.* – 2004 – Vol. 1. – P. 63-71.
6. *Normann R.A., Fernandez E.* Clinical applications of penetrating neural interfaces and Utah Electrode Array technologies // *Journal of Neural Engineering*. – 2016. – Vol. 13 (6). – 061003.
7. *Govindarajan A.V., Je M., Park W.-T., Achyuta A.K.H.* MEMS as implantable neuroprobes // *MEMS for Biomedical Applications*. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – P. 361-395.
8. *Jun J.J., Steinmetz N.A., Siegle J.H. [et al.]*. Fully integrated silicon probes for high-density recording of neural activity // *Nature*. – 2017. – Vol. 551, No. 7679. – P. 232-236.
9. *Gao K., Li S., Zhuang L. [et al.]*. In vivo bioelectronic nose using transgenic mice for specific odor detection // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2018. – Vol. 102. – P. 150-156.
10. *Negi S., Bhandari R.* Silicon isotropic and anisotropic etching for MEMS applications // *Microsystem Technologies*. – 2013. – Vol. 19 (2). – P. 203-210.
11. Нанотехнологии в микроэлектронике / под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплёва. – М.: Наука, 2019. – 511 с. – ISBN 978-5-02-040201-0.
12. *Shikida M., Sato K., Tokoro K., Uchikawa D.* Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2000. – Vol. 80, No. 2. – P. 179-188.
13. *Zubel I.* Anisotropic etching of Si // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2019. – Vol. 29, No. 9. – 093002.
14. *Rao A.V.N., Swarnalatha V., Pal P.* Etching characteristics of Si {110} in 20% KOH with addition of hydroxylamine for the fabrication of bulk micromachined MEMS // *Micro and Nano Systems Letters*. – 2017. – Vol. 5, No. 23. – P. 1-9.
15. *Малохатко С.В., Гусев Е. Ю.* Исследование маскирующих свойств пленок оксида кремния для создания кремниевых мембран методом жидкостного травления // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 6. – С. 196-203.
16. *Stiller A.M., González-González M.A., Boothby J.M. [et al.]*. Mechanical considerations for design and implementation of peripheral intraneural devices // *Journal of Neural Engineering*. – 2019. – Vol. 16 (6). – 064001.
17. *Seidel H., Csepregi L., Heuberger A. [et al.]*. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1990. – Vol. 137 (11). – P. 3612-3625.
18. *Малохатко С.В., Гусев Е.Ю., Агеев О.А.* Разработка стреловидного кантилевера для многочастотной атомно-силовой микроскопии // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 3. – С. 171-178.
19. *Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю.* Технология изготовления многоэлектродного микрозонда для малоинвазивного нейрокомпьютерного интерфейса // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 6. – С. 61-70.
20. *Pal P., Swarnalatha V., Rao A.V.N. [et al.]*. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review // *Micro and Nano Systems Letters*. – 2021. – Vol. 9. – 4.

## REFERENCES

1. *Rivnay J., Wang H., Fenno, L. [et al.]*. Next-generation probes, particles, and proteins for neural interfacing, *Science Advances*, 2017, Vol. 3 (6), e1601649.
2. *Seymour J.P., Wu F., Wise K.D. [et al.]*. State-of-the-art MEMS and microsystem tools for brain research // *Microsystems & Nanoengineering*. – 2017. – Vol. 3. – 16066.
3. *Obidin N., Tasnim F., Dagdeviren C.* The Future of Neuroimplantable Devices: A Materials Science and Regulatory Perspective, *Advanced Materials*, 2019, Vol. 32 (15), 1901482.
4. *Szostak K.M., Grand L., Constandinou T.G.* Neural Interfaces for Intracortical Recording: Requirements, Fabrication Methods, and Characteristics // *Frontiers in Neuroscience*. – 2017. – Vol. 11. – 665.

5. Leuthardt E.C., Schalk G., Wolpaw J.R. [et al.]. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans, *J. Neural Eng.*, 2004, Vol. 1, pp. 63-71.
6. Normann R.A., Fernandez E. Clinical applications of penetrating neural interfaces and Utah Electrode Array technologies, *Journal of Neural Engineering*, 2016, Vol. 13 (6), 061003.
7. Govindarajan A.V., Je M., Park W.-T., Achyuta A.K.H. MEMS as implantable neuroprobes, *MEMS for Biomedical Applications*. Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 361-395.
8. Jun J.J., Steinmetz N.A., Siegle J.H. [et al.]. Fully integrated silicon probes for high-density recording of neural activity, *Nature*, 2017, Vol. 551, No. 7679, pp. 232-236.
9. Gao K., Li S., Zhuang L. [et al.]. In vivo bioelectronic nose using transgenic mice for specific odor detection, *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, Vol. 102, pp. 150-156.
10. Negi S., Bhandari R. Silicon isotropic and anisotropic etching for MEMS applications, *Microsystem Technologies*, 2013, Vol. 19 (2), pp. 203-210.
11. Nanotechnologii v mikroelektronike [Nanotechnologies in microelectronics], ed. by O.A. Ageeva, B.G. Konoplyova. Moscow: Nauka, 2019, 511 p. ISBN 978-5-02-040201-0.
12. Shikida M., Sato K., Tokoro K., Uchikawa D. Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, Vol. 80, No. 2, pp. 179-188.
13. ZubeI I. Anisotropic etching of Si, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, Vol. 29, No. 9, 093002.
14. Rao A.V.N., Swarnalatha V., Pal P. Etching characteristics of Si {110} in 20% KOH with addition of hydroxylamine for the fabrication of bulk micromachined MEMS, *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, Vol. 5, No. 23, pp. 1-9.
15. Malokhatko S.V., Gusev E. Yu. Issledovaniye maskiruyushchikh svoystv plenok oksida kremniya dlya sozdaniya kremniyevykh membran metodom zhidkostnogo travleniya [Research of masking properties of silicon oxide films for silicon membrane fabrication by wet etching], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6, pp. 196-203.
16. Stiller A.M., González-González M.A., Boothby J.M. [et al.]. Mechanical considerations for design and implementation of peripheral intraneural devices, *Journal of Neural Engineering*, 2019, Vol. 16 (6), 064001.
17. Seidel H., Csepregi L., Heuberger A. [et al.]. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers, *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, Vol. 137 (11), pp. 3612-3625.
18. Malokhatko S.V., Gusev E.Yu., Ageev O.A. Razrabotka strelovidnogo kantilevera dlya mnogochastotnoj atomno-silovoj mikroskopii [Development of the swept cantilever for multifrequency atomic force microscopy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3, pp. 171-178.
19. Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y. Tekhnologiya izgotovleniya mnogiektrodnogo mikrosonda dlya maloinva-zivnogo nejrokompyuternogo interfejsa [Process technology of multielectrode microprobe for a minimally invasive neurocomputer interface], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 6, pp. 61-70.
20. Pal P., Swarnalatha V., Rao A.V.N. [et al.]. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review, *Micro and Nano Systems Letters*, 2021, Vol. 9, 4.

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

**Гусев Евгений Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: eyugusev@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371940; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; доцент.

**Сарьев Артур Владимирович** – e-mail: asaryev@sfned.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Gusev Evgeny Yuryevich** – Southern Federal University; e-mail: eyugusev@sfned.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371940; department of nanotechnology and microsystems technology; associate professor;

**Saryev Artur Vladimirovich** – e-mail: asaryev@sfned.ru; department of nanotechnology and microsystems technology; student.

С.В. Малохатко, Д.А. Бакшевников, Е.Ю. Гусев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ АНИЗОТРОПНОГО ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

*Основным материалом большинства механических сенсоров является кремний. Для формирования кремниевых структур используют методы объемной микрообработки – глубокое травление подложки. Для формирования структур, к которым предъявляются высокие требования по точности размеров и воспроизводимости, традиционно применяются высокие требования по точности размеров и воспроизводимости, традиционно применяются анизотропное жидкостное травление. В качестве травителя при этом используют водный раствор щелочи. Определение оптимального режима по концентрации и температуре раствора позволит получить относительно однородную, гладкую поверхность при высокой скорости травления. В работе проведено экспериментальное исследование влияния концентрации (20-40%) и температуры (60–80°C) водного раствора КОН на скорость травления монокристаллического кремния, а также морфологию поверхности в условиях длительного процесса травления. Значения скорости травления в 20%, 30% и 40% растворе для выбранного температурного диапазона составили 0,68-2,0 мкм/мин, 0,77–2,4 мкм/мин и 0,7–1,9 мкм/мин, соответственно. Проведен анализ морфологии поверхности кремния на глубине 270 мкм. Установлено, что при концентрации раствора КОН 20% и 80°C формируется развитая морфология поверхности с шероховатостью ~ 400 нм; понижение температуры раствора позволяет получить более ровную поверхность с остаточной шероховатостью ~ 340 нм. При концентрации раствора КОН 30% поверхность более однородна с шероховатостью ~ 100 нм; изменение температуры от 60 до 80 °C практически не оказывает влияние на ее морфологию. При концентрации раствора КОН 40% и 80°C исходный рельеф поверхности травления достаточно развит ~ 340 нм, а снижение температуры раствора до 60°C позволяет свести его до состояния, характерного условию травления при 30% и температуре 80°C.*

*Объемная микрообработка; анизотропное жидкостное травление; кремний; гидроксид калия; концентрация; температура.*

S.V. Malokhatko. D.A. Bakshevnikov. E.Yu. Gusev

## RESEARCH OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION ON ANISOTROPIC WET ETCHING OF MONOCRYSTALLINE SILICON

*The main material of most mechanical sensors is silicon. For the formation of silicon structures, the methods of bulk micromachining - deep etching of the substrate – are used. Anisotropic wet etching is traditionally used to form structures that are subject to high requirements for dimensional accuracy and reproducibility. In this case, an aqueous solution of alkali is used as an etchant. Determining the optimal mode by the concentration and temperature of the solution will allow you to obtain a relatively uniform, smooth surface at a high etching rate. An experimental study of the influence of concentration (20-40%) and temperature (60-80°C) was carried an aqueous KOH solution on the etching rate of monocrystalline silicon, as well as the surface morphology under conditions of a long etching process. The etching rates in 20%, 30%, and 40% solution for the selected temperature range were 0.68–2.0 μm/min, 0.77–2.4 μm/min, and 0.7–1.9 μm/min, respectively. The morphology of the silicon surface at a depth of 270 microns was analyzed. It was found that at a solution concentration of 20% KOH and 80°C, a developed surface morphology with a roughness of ~ 400 nm is formed; a decrease in the solution temperature makes it possible to obtain a more even surface with a residual roughness of ~ 340 nm. At a concentration of 30% KOH solution, the surface is more uniform with a roughness of ~ 100 nm; a change in temperature from 60 to 80 °C has almost no effect on its morphology. At a concentration of KOH solution of*

40% and 80°The initial relief of the etching surface is sufficiently developed ~ 340 nm, and a decrease in the temperature of the solution to 60°C allows it to be reduced to a state characteristic of the etching condition at 30% and a temperature of 80°C.

*Bulk micromachining; anisotropic wet etching; silicon; potassium hydroxide; concentration; temperature.*

**Введение.** Основным материалом большинства механических сенсоров является кремний [1–3]. Для изготовления структур из материала подложки применяются методы объемной микрообработки, включая жидкостное изотропное и анизотропное травление [1, 2]. При изотропном жидкостном травлении структура травится с одинаковой скоростью во всех направлениях. При этом происходит подтрав под маску защитного покрытия, в связи с чем обеспечение точных размеров становится проблемой [4]. При анизотропном травлении скорость травления зависит от кристаллографического направления, что позволяет получать структуры меньших размеров с высокой точностью [5]. Таким образом, анизотропное жидкостное травление предпочтительнее для изготовления структур к которым предъявляются требования по обеспечению воспроизводимости точных размеров. В качестве травителей в такой технологии используются водные растворы гидроксида калия (KOH) [6], гидроксида натрия (NaOH) [7], этилдиамин ( $H_2NCH_2CH_2NH_2$ ) [8], гидроксида тетраметиламмония ( $(CH_3)_4NOH$ ) [9]. В силу меньшей токсичности щелочных растворов они применяются чаще. В технологических процессах, не использующих алюминий, предпочтение отдают раствору KOH. Основными параметрами этого процесса является температура и концентрация раствора. Они определяют скорость травления и шероховатость поверхности травления. Последняя должна быть ниже критического значения, задаваемого конструктивно-технологическими ограничениями. Однородность поверхности травления при приемлемой длительности может быть достигнута подбором температуры и концентрации раствора, а также введением дополнительных примесей [10–17]. При этом время травления влияет на морфологию поверхности и дефектообразование в структуре [18]. В связи с чем актуальной задачей является изучение влияния температуры и концентрации растворов на морфологию поверхности в условиях длительного процесса травления.

Цель работы заключается в исследовании влияния температуры и концентрации раствора KOH на скорость травления и шероховатость поверхности монокристаллического кремния.

**Методы исследования.** Подложки получали резкой полированной с двух сторон кремниевой пластины КЭФ(100)-4,5 толщиной 320 мкм. После их очистки на обе стороны подложек наносили пленки  $SiO_x$  толщиной 2 мкм методом плазмохимического осаждения из газовой фазы [19]. Затем на одной из сторон (лицевой стороне) подложек в пленке оксида формировали окна с топологическим рисунком квадратной формы. Для этого проводили контактную фотолитографию и травление оксида в растворе  $NH_4F:HF(6:1)$ . После чего переходили к травлению кремния в растворе KOH на глубину 270 мкм. Исследование скорости травления полученных образцов проводили при температуре 60°C, 70°C и 80°C и концентрации раствора – 20%, 30% и 40%.

Скорость травления рассчитывали по временной зависимости глубины травления. Последнюю измеряли методом стилусной профилометрии. Состояние поверхности травления характеризовали по данным оптической микроскопии и стилусной профилометрии.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведена серия процессов анизотропного жидкостного травления монокристаллического кремния через окно в маскирующем покрытии плазменного диоксида кремния. Остаточная толщина

подложек в области травления составила 50 мкм. Для каждого значения концентрации раствора КОН и температуры были определены скорости травления кремния. Соответствующие экспериментальные зависимости скорости травления от температуры для выбранных концентраций показаны на рис. 1.

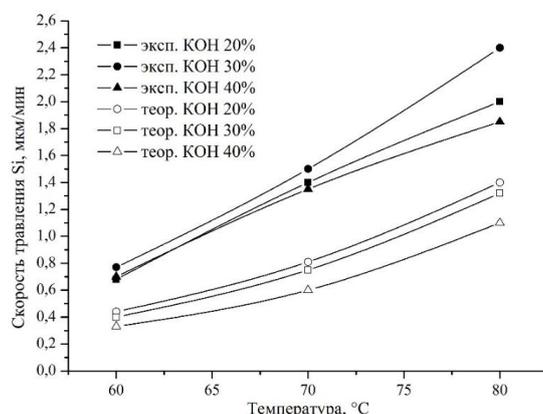


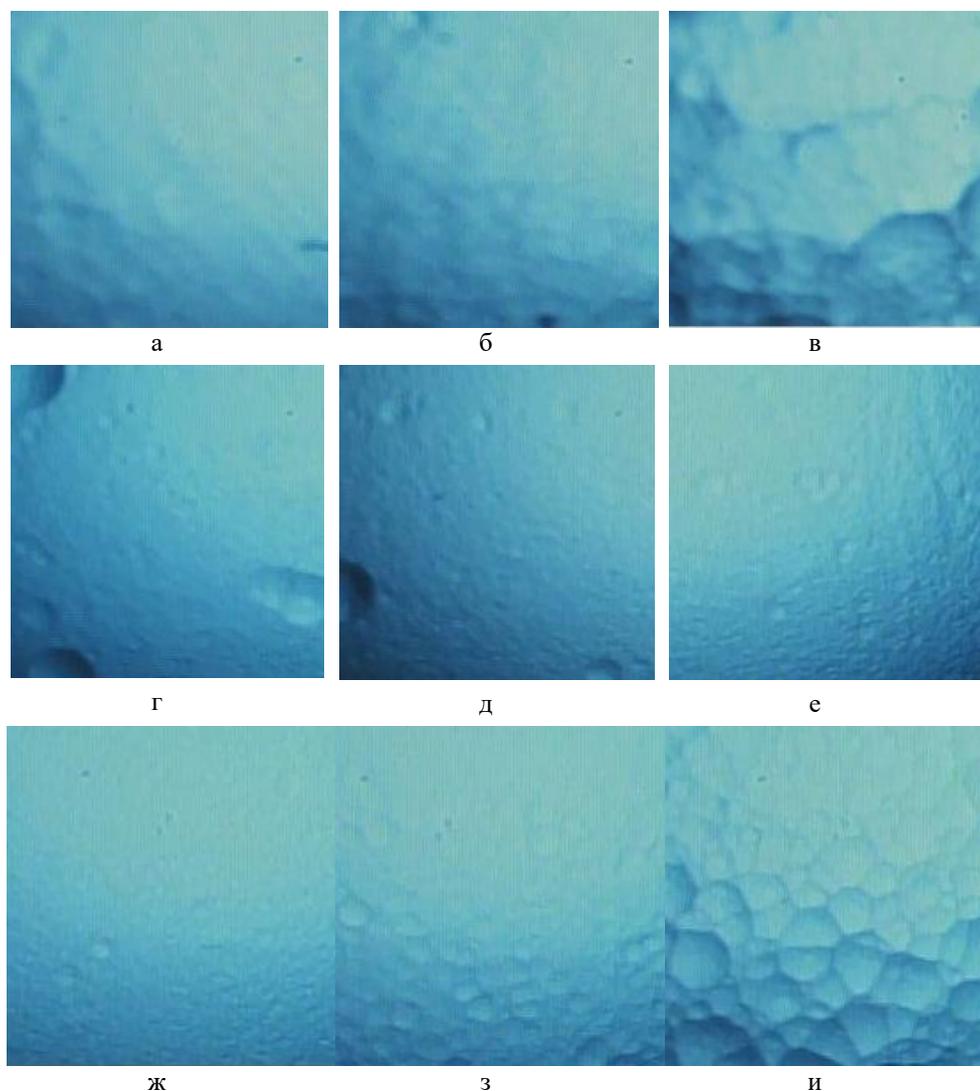
Рис. 1. Зависимость скорости травления кремния от температуры раствора

Из рис. 1 видно, что экспериментальные значения скорости травления не совпадают с теоретическими данными, приведенными в [20], не только по абсолютным значениям, но и по характеру влияния концентрации раствора. Отличие первых может быть объяснено разным уровнем легирования исходной подложки [20, 21]. Согласно теоретическим расчетам скорость травления падает с понижением температуры и увеличением концентрации. Однако, по экспериментальным данным, отклонение от такой тенденции наблюдается на небольшом диапазоне концентраций в окрестности 20%, где скорость травления не уменьшается, а увеличивается. Отмеченный характер влияния температуры сохраняется для всех концентраций раствора.

Изменение морфологии поверхности травления кремния в зависимости от концентрации и температуры показано на рис. 2. Значения шероховатости поверхности травления определены по профилям, полученным методом стилусной профилометрии. Так при концентрации раствора КОН 20% и температуре 80°C формируется развитая морфология поверхности с среднеквадратичным значением шероховатости  $R_q \approx 400$  нм; понижение температуры раствора позволяет получить более ровную поверхность с остаточной шероховатостью  $R_q \approx 340$  нм. При концентрации раствора КОН 30% поверхность получается более однородной ( $R_q \approx 95$  нм), чем при 20%. Изменение температуры от 60 до 80 °C практически не оказывает влияние на морфологию поверхности. При концентрации раствора КОН 40% и температуре 80°C – рельеф поверхности травления достаточно развит, поверхность шероховатая ( $R_q \approx 337,65$  нм). Однако по мере снижения температуры раствора до 60°C поверхность выравнивается до состояния, характерного условию травления при 30% и температуре 80°C.

Характерный вид поверхности травления и его изменение (см. рис. 2) может быть связан с выделением водорода в процессе травления. При травлении в растворе КОН 20% на поверхности кремния образуются пузырьки водорода диаметром приблизительно  $1 \pm 0,2$  мм. При повышении концентрации до 40% диаметр пузырьков уменьшается приблизительно до  $0,5 \pm 0,2$  мм. С ростом температуры интенсивность их образования возрастает и, соответственно, увеличивается количество пузырьков. Можно предположить, что с повышением концентрации и температуры раствора,

увеличивающаяся скорость реакции насыщает приповерхностный слой кремния силикатами, которые не успевают удаляться из зоны реакции, что в свою очередь негативно сказывается на скорости травления и морфологии поверхности.



*Рис. 2. Морфология поверхности кремния после травления в растворе: а – КОН 20% при 60°C; б – КОН 20% при 70°C; в – КОН 20% при 80°C; г – КОН 30% при 60°C; д – КОН 30% при 70°C; е – КОН 30% при 80°C; ж – КОН 40% при 60°C; з – КОН 40% при 70°C; и – КОН 40% при 80°C*

Экспериментально установлено, что наиболее гладкая поверхность получается при травлении в растворах КОН 30% и 40% при температурах 80°C и 60 °C, соответственно. Наиболее развитая, шероховатая поверхность формируется травлением в растворе КОН 20% при 80°C. Таким образом, при изготовлении кремниевых структур сенсоров, для которых шероховатость поверхности является критичной, предпочтительно использовать раствор КОН 30%, который позволяет получить более однородную поверхность при достаточно высокой скорости травления.

**Заключение.** В работе исследованы температурно-концентрационные режимы анизотропного жидкостного травления монокристаллического кремния марки КЭФ(100)-4,5. Определены скорости травления кремния в 20%, 30% и 40% растворе KOH в температурном диапазоне 60-80°C, которые составили 0,68-2,0 мкм/мин, 0,77-2,4 мкм/мин и 0,7-1,9 мкм/мин, соответственно. Проведен анализ влияния режимов на морфологию поверхности в условиях длительного травления (на глубину 270 мкм). Показано, что более гладкая поверхность получается при травлении в растворах KOH с концентрацией 30% при температуре 80°C ( $R_q \approx 95$  нм) и 40% при температуре 60°C. Наиболее развитая морфология поверхности получается при травлении в растворе KOH 20% при 80°C ( $R_q \approx 400$  нм).

Результаты исследования могут быть полезны при разработке технологических процессов изготовления кремниевых структур, предполагающих использование в качестве травителя водные раствора KOH.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90087 с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малохатко С.В., Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю. Проектирование и формирование кремниевых мембран для акустических датчиков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 6. – С. 53-61.
2. Нанотехнологии в микроэлектронике / под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплева. – М.: Наука, 2019. – 511 с. – ISBN 978-5-02-040201-0.
3. Pal P., Sato K. Complex three dimensional structures in Si {100} using wet bulk micromachining // Micromechanics and Microengineering – 2009. – Vol. 19 (10). – 105008.
4. Negi S., Bhandari R. Silicon isotropic and anisotropic etching for MEMS applications // Microsystem Technologies. – 2013. – Vol. 19(2). – P. 203-210.
5. Franssila Sami. Anisotropic Wet Etching // Introduction to Microfabrication. – 2010. – P. 237-254.
6. Lu H., Zhang H., Jin M. [et al.]. Two-Layer Microstructures Fabricated by One-Step Anisotropic Wet Etching of Si in KOH Solution // Micromachines. – 2016. – Vol. 7 (2). – 19.
7. Jing D., Shi-Hua H. Low-reflective surface texturing for large area multicrystalline silicon using NaOH-NaClO solution // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2014. – Vol. 50(1). – P. 28-32.
8. Dutta S., Imran M., Kumar P. [et al.]. Comparison of etch characteristics of KOH, TMAH and EDP for bulk micromachining of silicon (110) // Microsystem Technologies. – 2011. – Vol. 17 (10-11). – P. 1621-1628.
9. Shikida M., Sato K., Tokoro K. [et al.]. Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000 – Vol. 80, No. 2. – P. 179-188.
10. Xing Y., Haldar S., Sato K. [et al.]. Anisotropic etching in low-concentration KOH: effects of surfactant concentration // Micro & Nano Letters. – 2015 – Vol. 10 (4). – P. 224-228.
11. Xu Y., Michael A., Kwok C. Formation of ultra-smooth 45 micromirror on (100) silicon with low concentration TMAH and surfactant: techniques for enlarging the truly 45 portion // Sensors and Actuators A: Physical. – 2011. – Vol. 166 (1) – P. 164-171.
12. Munoz D., Carreras P., Escarre J. [et al.]. Optimization of KOH etching process to obtain textured substrates suitable for heterojunction solar cells fabricated by HWCVD // Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517 – P. 3578-3580.
13. Tanaka H., Yamashita S., Abe Y. [et al.]. Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – Vol. 114(2) – P. 516-520.
14. Zubeł I., Kramkowska M. The effect of alcohol additives on etching characteristics in KOH solutions // Sensors and Actuators A: Physical. – 2002. – Vol. 101 (3) – P. 255-261.
15. Lee D., Yu K., Krishnamoorthy U. [et al.]. Vertical mirror fabrication combining KOH etch and DRIE of (110) silicon // Journal of Microelectromechanical Systems – 2009. – Vol. 18 (1). – P. 217-227.

16. Rola K. P. Anisotropic etching of silicon in KOH + Triton X-100 for 45° micromirror applications // *Microsystem Technologies*. – 2016. – Vol. 23 (5) – P. 1463-1473.
17. Narasimha Rao A. V., Swarnalatha V., Pal P. Etching characteristics of Si {110} in 20% KOH with addition of hydroxylamine for the fabrication of bulk micromachined MEMS // *Micro and Nano Systems Letters*. – 2017. – Vol. 5, No. 23. – P. 1-9.
18. Пауткин В.Е., Абдуллин Ф.А., Вергазов И.П. [и др.]. Исследование травленной в растворе гидроксида калия поверхности кремния // *Известия Вузов. Приборостроение*. – 2018. – Т. 61, № 10. – С. 915-921.
19. Малохатко С.В., Гусев Е. Ю. Исследование маскирующих свойств пленок оксида кремния для создания кремниевых мембран методом жидкостного травления // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 6. – С. 196-203.
20. Seidel H., Csepregi L., Heuberge A [et al.]. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1990. – Vol. 137 (11). – P. 3612-3625.
21. Seidel H., Csepregi L., Heuberge A [et al.]. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. II. Influence of Dopants // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1990. – Vol. 137 (11). – P. 3626-3632.

#### REFERENCES

1. Malohatko S. V., Gusev E. Yu., Jityaeva J. Y. Proektirovaniye i formirovaniye kremniyevykh membran dlya akusticheskikh datchikov [Design and formation of silicon membranes for acoustic sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 6, pp. 53-61.
2. Nanotekhnologii v mikroelektronike [Nanotechnologies in microelectronics], ed. by O.A. Ageeva, B.G. Konoplyova. Moscow: Nauka, 2019, 511 p. ISBN 978-5-02-040201-0.
3. Pal P., Sato K. Complex three dimensional structures in Si {100} using wet bulk micromachining, *Micromechanics and Microengineering*, 2009, Vol. 19 (10), 105008.
4. Negi S., Bhandari R. Silicon isotropic and anisotropic etching for MEMS applications, *Microsystem Technologies*, 2013, Vol. 19 (2), pp. 203–210.
5. Franssila Sami. Anisotropic Wet Etching, *Introduction to Microfabrication*, 2010, pp. 237-254.
6. Lu H., Zhang H., Jin M. [et al.]. Two-Layer Microstructures Fabricated by One-Step Anisotropic Wet Etching of Si in KOH Solution, *Micromachines*, 2016, Vol. 7 (2), 9.
7. Jing D., Shi-Hua H. Low-reflective surface texturing for large area multicrystalline silicon using NaOH-NaClO solution, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, Vol. 50(1), pp. 28-32.
8. Dutta S., Imran M., Kumar P. [et al.]. Comparison of etch characteristics of KOH, TMAH and EDP for bulk micromachining of silicon (110), *Microsystem Technologies*, 2011, Vol. 17 (10–11), pp 1621-1628.
9. Shikida M., Sato K., Tokoro K., Uchikawa D. Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, Vol. 80, No. 2, pp. 179-188.
10. Xing Y., Haldar S., Sato K. [et al.]. Anisotropic etching in low-concentration KOH: effects of surfactant concentration, *Micro & Nano Letters*, 2015, Vol. 10 (4), pp. 224-228.
11. Xu Y., Michael A., Kwok C. Formation of ultra-smooth 45 micromirror on (100) silicon with low concentration TMAH and surfactant: techniques for enlarging the truly 45 portion, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, Vol. 166(1), pp. 164-171.
12. Munoz D., Carreras P., Escarre J. [et al.]. Optimization of KOH etching process to obtain textured substrates suitable for heterojunction solar cells fabricated by HWCVD, *Thin Solid Films*, 2009, Vol. 517, pp. 3578-3580.
13. Tanaka H., Yamashita S., Abe Y. [et al.]. Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, Vol. 114 (2), pp. 516-520.
14. Zubeł I., Kramkowska M. The effect of alcohol additives on etching characteristics in KOH solutions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, Vol. 101 (3), pp. 255-261.
15. Lee D., Yu K., Krishnamoorthy U. [et al.]. Vertical mirror fabrication combining KOH etch and DRIE of (110) silicon, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, Vol. 18 (1), pp. 217-227.

16. Rola K. P. Anisotropic etching of silicon in KOH + Triton X-100 for 45° micromirror applications, *Microsystem Technologies*, 2016, Vol. 23(5), pp. 1463-1473.
17. Narasimha Rao A. V., Swarnalatha V., Pal P. Etching characteristics of Si {110} in 20% KOH with addition of hydroxylamine for the fabrication of bulk micromachined MEMS, *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, Vol. 5, No. 23, pp. 1-9.
18. Pautkin V.E., Abdullin F.A., Vergazov I.R. [i dr.]. Issledovanie travlenoy v rastvore gidroksida kaliya poverkhnosti kremniya [Investigation of the silicon surface etched in a solution of potassium hydroxide], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2018, Vol. 61, No. 10, pp. 915-921.
19. Malokhatko S.V., Gusev E.Yu. Issledovaniye maskiruyushchikh svoystv plenok oksida kremniya dlya sozdaniya kremniyevykh membran metodom zhidkostnogo travleniya [Research of masking properties of silicon oxide films for silicon membrane fabrication by wet etching], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6, pp. 196-203.
20. Seidel H., Csepregi L., Heuberge A [et al.]. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers, *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, Vol. 137 (11), pp. 3612-3625.
21. Seidel H., Csepregi L., Heuberge A [et al.]. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. II. Influence of Dopants, *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, Vol. 137 (11), pp. 3626-3632.

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

**Малохатко Софья Владимировна** – Южный федеральный университет; e-mail: malohatko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: +79289003841; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

**Бакшевников Даниил Антонович** – e-mail: bakshevnikov@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Гусев Евгений Юрьевич** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; тел: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Malokhatko Sofya Vladimirovna** – Southern Federal University; e-mail: malohatko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289003841; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate.

**Bakshevnikov Daniil Antonovich** – e-mail: bakshevnikov@sfedu.ru; the department of nanotechnology and microsystem technics; student.

**Gusev Evgeny Yurievich** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone:+78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

## Раздел III. Связь, навигация и радиолокация

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-135-142

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

### ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕДАТЧИКА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

*Задающий генератор передатчика является важнейшей составной частью, так как определяет его стабильность и диапазонные свойства. На рынке России имеется множество моделей автогенераторов отечественного и зарубежного производства. Они различаются по элементной базе (активному элементу), массе, габаритам, стоимости, диапазону рабочих частот и другим параметрам. Во многих случаях паспорт и технические условия не содержат ряд параметров, важных для потребителя. Целью данной работы является исследование основных характеристик генератора, в том числе не задекларированных поставщиком. Объектом исследования является генераторный модуль СВЧ в типовой схеме включения. Представлены результаты экспериментального исследования ГУН, работающего в области 5 ГГц. Дана оценка паразитных продуктов в спектре выходного сигнала. Представлены фото спектра выходного сигнала, демонстрирующего малую ширину спектральной линии. Измерены модуляционные характеристики при изменении управляющего напряжения и напряжения питания, вычислена их средняя крутизна. Эти данные позволяют предъявить обоснованные требования к стабильности управляющего и питающего напряжений. Полученные результаты могут быть использованы в приёмно-передающей аппаратуре связи, навигации. Статья расширяет представление о линейке отечественных генераторов, демонстрирует их высокие электрические характеристики. Достигнуты следующие электрические параметры: – диапазон рабочих частот от 4968 до 5448 МГц; – выходная мощность не менее 11 дБм; – напряжение питания минус 16 В; – управляющее напряжение от 5 до 31,5 В.*

*Генератор; управляемый напряжением; сантиметровый диапазон волн; эксперимент; модуляционная характеристика; ширина спектра.*

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

### MASTER GENERATOR OF CENTIMETER-WAVE INTERFERENCE TRANSMITTER

*The master generator of the transmitter is the most important component, since it determines its stability and range properties. In the Russian market there are many models of auto generators of domestic and foreign production. They differ in the element base (active element), weight, dimensions, cost, operating frequency range, and other parameters. In many cases, the passport and technical specifications do not contain a number of parameters that are important for the consumer. The purpose of this work is to study the main characteristics of the generator, including those not declared by the supplier. The object of the study is a microwave generator module in a typical switching scheme. The results of an experimental study of a VCO operating in the 5 GHz region are presented. The estimation of parasitic products in the spectrum of the output signal is given. Photos of the spectrum of the output signal showing a small width of the spectral line are presented. The modulation characteristics are measured when the control voltage and supply voltage change, and their average steepness is calculated. These data allow us to make reasonable requirements for the stability of the control and supply voltages. The results obtained can be used in receiving and transmitting equipment for communication, navigation, and electronic warfare. The article expands the idea of the line of domestic generators, demonstrates their high*

*electrical characteristics. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency range from 4968 to 5448 MHz; – output power of at least 11 dBm; – supply voltage minus 16 V; – control voltage from 5 to 31.5 V.*

*Voltage-controlled generator; centimeter wave range; experiment; modulation characteristic; spectrum width.*

**Введение.** По генераторам с электронной перестройкой частоты опубликовано значительное число работ, в том числе монографии [1–5], учебные пособия [6–9], статьи [10–13], реклама [14, 15], однако появление новых требований, совершенствование элементной базы заставляет разработчиков искать новые схемотехнические и конструктивно-технологические решения.

Объектом исследования в данной работе является автогенератор сантиметрового диапазона волн, управляемый напряжением.

Целью работы является получение экспериментальных характеристик генератора, в том числе модуляционных характеристик, выбега частоты, выходного спектра.

К исследуемому генератору предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 5000 до 5400 МГц;
- ◆ выходная мощность не менее 10 дБм;
- ◆ напряжение питания минус 16 В;
- ◆ управляющее напряжение от 5 до 30 В;
- ◆ сопротивление нагрузки 50 Ом;
- ◆ неравномерность выходной мощности в диапазоне рабочих частот не более 5 дБ;
- ◆ количество выходов – 2.

Перечисленные выше требования можно реализовать в генераторе на транзисторах [3, 8], на диоде Ганна [7], на лавинно-пролётном диоде и на микросхемах [6]. Десятки лет назад использовались технические решения с применением клистронов и ламп обратной волны [4, 5]. Ниже в табл. 1 приведены краткие технические характеристики нескольких полупроводниковых генераторов сантиметрового диапазона волн, взятые из справочных листов.

Таблица 1

**Управляемые генераторы сантиметрового диапазона волн  
(непрямые аналоги)**

Тип микросхемы	Частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$ , дБм
НМС358MS8G	5,8 – 6,8	10
НМС384LP4	2,05 – 2,25	3,5
НМС385LP4	2,25 – 2,5	4,5
НМС386LP4	2,6 – 2,8	5
НМС388LP4	3,15 – 3,4	4,9
НМС389LP4	3,35 – 3,55	4,7
НМС390LP4	3,55 – 3,9	4,7
НМС391LP4	3,9 – 4,45	5
НМС416LP4	2,75 – 3	4,5
НМС429LP4	4,45 – 5	4
НМС430LP4	5 – 5,5	2
НМС431LP4	5,5 – 6,1	2
НМС466LP4	6,1 – 6,72	4,5
НМС505LP4	6,8 – 7,4	11
НМС506LP4	7,8 – 8,7	14
НМС532LP4	7,1 – 7,9	14

**Схема и конструкция.** Автогенератор построен по схеме с общим коллектором на биполярном транзисторе 2Т642А-2 [16]. Для перестройки генератора в диапазоне частот в резонатор генератора включён варактор. Автогенератор запитан со стороны эмиттера напряжением минус 16 В. Управляющее напряжение на варактор подаётся в пределах от 5 до 45 В.

Конструкция генератора представляет собой герметичную микросборку в форме цилиндра длиной 82 мм и диаметром 33 мм. Два выхода, установленные на образующей цилиндра, оформлены в виде соединителей ряда IX по ГОСТ 13317-89, гнездо, тип 1 [17]. Напряжения питания и управления подаются на две коаксиальные вилки, установленные на торце цилиндра.

Внутри цилиндра установлена печатная плата автогенератора из поликора и два развязывающих ферритовых циркулятора. Печатная плата на поликоре изготовлена по тонкоплёночной технологии [18].

**Эксперимент.** Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1. Основной измерительный прибор –анализатор спектра типа MXA N9020В фирмы Keysight.

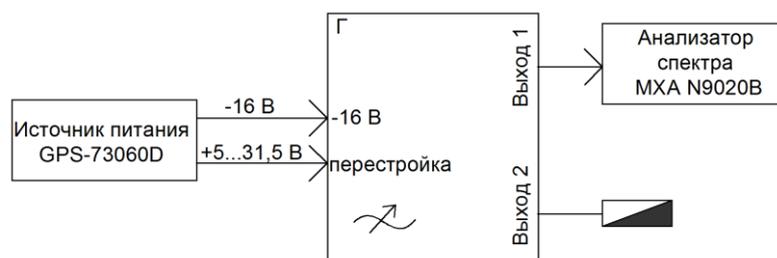


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте исследована зависимость мощности и частоты от управляющего напряжения с шагом 1 В. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики на рис. 2. В этом эксперименте использовался прогретый генератор.

Таблица 2

**Результаты измерений генератора**

Уупр, В	Частота, МГц	Рвых, дБм
	4968	11.81
	4992	11.24
	5013	11.23
	5035	11.52
	5055	11.93
	5073	12.13
	5092	11.86
	5111	11.62
	5133	11.97
	5153	12.39
	5173	12.54
	5192	12.49
	5211	12.52
	5230	12.83

	5248	12.99
	5265	13.14
	5284	13.37
	5302	13.74
	5318	14.06
	5334	14.27
	5350	14.46
	5365	14.61
	5380	14.72
	5396	14.95
	5412	15.11
	5426	15.05
	5441	15.09
31.5	5448	15.08

Во втором эксперименте снята зависимость частоты от напряжения питания с шагом 0,2 В. Результаты измерений заносились в табл. 3. Из табл. 3 видно, что частота генерации не зависит от напряжения питания благодаря встроенному стабилизатору напряжения. В этом эксперименте использовался прогретый генератор.

В третьем эксперименте снят выбег частоты с шагом 1 минута в течении 12 минут. Результаты измерений заносились в табл. 4. По данным табл. 4 построен график на рис. 3. Из этого графика видно, что стационарное значение частоты достигается через 5 минут после включения. Это свидетельствует о хорошем отводе тепла от транзистора на подложку и облегчённом режиме работы транзистора. В этом эксперименте использовался остывший генератор.

В четвёртом эксперименте проводилось фотографирование спектра сигнала. Его можно видеть на рис. 4. Из этого рисунка видно, что боковые лепестки спектра подавлены на 45–50 дБ, что является удовлетворительным результатом.

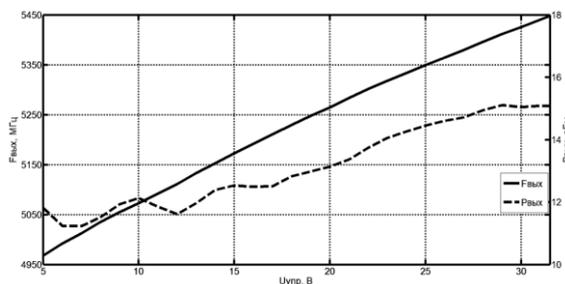


Рис. 2. Зависимость мощности и частоты от управляющего напряжения

Таблица 3

**Зависимость частоты от напряжения питания при U<sub>упр</sub> = 10 В**

U <sub>упр</sub> , В	Частота, МГц
15	5073.849
15.2	5073.849
15.4	5074.043
15.6	5073.946
15.8	5073.849
16	5073.946

16.2	5073.946
16.4	5073.801
16.6	5073.849
16.8	5073.849
17	5073.849

Таблица 4

**Выбег частоты при  $U_{упр} = 10 В$ ;  $U_{пит} = -16 В$**

Время, мин	Частота, МГц
	5070.662
	5072.304
	5073.366
	5073.849
	5074.043
	5074.043
	5074.043
	5073.994
	5074.043
	5074.043
	5073.946
	5074.043

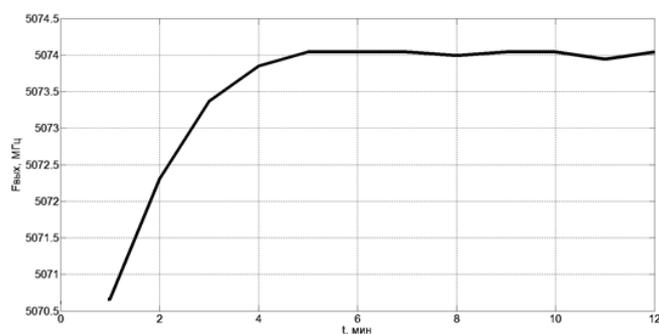


Рис. 3. Выбег частоты за 12 минут

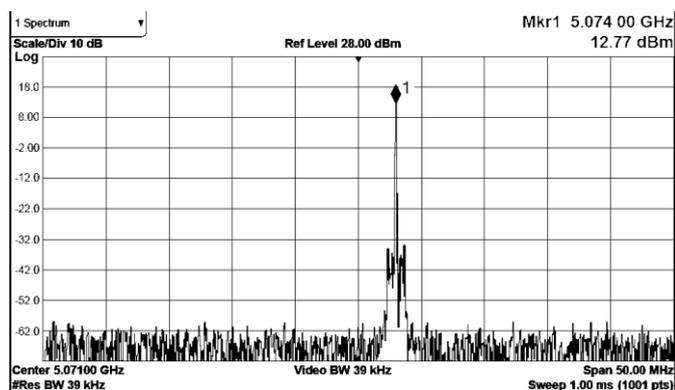


Рис. 4. Фото спектра выходного сигнала генератора при  $U_{упр} = 10 В$

Ниже в табл. 5 приведены основные параметры автогенератора, заданные и измеренные.

Таблица 5

### Основные параметры генератора

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Нижняя частота генерации, МГц	5000	4968
Верхняя частота генерации, МГц	5400	5448
Выходная мощность, не менее, дБм	10	11,23
Напряжение питания, В	Минус 16	Минус 16
Напряжение управления, В	5 – 30	5 – 31,5
Ток потребления, мА	50	50
Сопrotивление нагрузки, Ом	50	50
Минимальная крутизна перестройки, МГц/В	–	14
Максимальная крутизна перестройки, МГц/В	–	24
Неравномерность выходной мощности, дБ	5	3,88
Количество выходов	2	2
Выбег частоты за 12 минут после включения, МГц	–	3,43

**Заключение.** Из табл. 5 видно, что все требования к генератору выполняются. Генератор рекомендуется использовать в передатчиках помех в качестве задающего. Высокая линейность модуляционной характеристики, отсутствие перегибов частоты позволяет применять его в приёмно-передающей и измерительной аппаратуре.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешиников В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
2. Соколинский В.Г., Шейнкман В.Г. Частотные и фазовые модуляторы и манипуляторы. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
3. Верещагин Е.М. и др. Транзисторно-варакторные генераторы / под ред. Ю.Г. Никитенко. – Киев: Техника, 1979. – 175 с.
4. Верещагин Е.М. Модуляция в генераторах СВЧ. – М.: Сов. радио, 1972. – 304 с.
5. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 325 с.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
7. Романюк В.А. Аналоговые устройства приёмопередатчиков: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2018. – 144 с.
8. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 176 с.
9. Бахвалова С.А., Романюк В.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
10. Андрианов А.В., Давтян А.Д., Зикий А.Н. Генератор ЧМ сигналов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: [ivdon.ru/tu/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/tu/magazine/archive/n2y2019/5722/).
11. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Падалко А.Д. Задающий генератор для передатчика скользящих помех // Сборник научных трудов 14 международной конференции «Наука России: цели и задачи». Ч. 4. – Екатеринбург: НИЦ «Л-Журнал», 2019. – С. 5-8.

12. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Шутлов И.И. ЧМ – генератор с высокой линейностью модуляционной характеристики // МНК теоретических и прикладных разработок «Научные разработки: евразийский регион». – М., 2019. – С. 111-114.
13. Мазеев Е.В., Фурсаев М.А. Проектирование СВЧ транзисторного генератора с варакторной перестройкой частоты и моделирование его электрических характеристик // Вестник СГТУ. – 2011. – № 3 (57). – Вып. 1. – С. 68-73.
14. Дьяконов В.П. Монолитные СВЧ – генераторы и синтезаторы компании Hittite Microwave // Компоненты и технологии. – 2012, – № 3. – С. 19-28.
15. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1. Приборы общего назначения. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 600 с.
16. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности СВЧ и их зарубежные аналоги // Справочник. Т. 4. – М.: КУБК-а, 1997. – 544 с.
17. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
18. Климачёв И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / под ред. А.Н. Королёва. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с.
19. Andrei Grebennikov. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007
20. Ali Hajimiri, Thomas H. Lee. The Design of Low Noise Oscillators. – Kluwer Academic Publishers, New York et al., 2003. – 207 p.

## REFERENCES

1. Kochemasov V.N., Belov L.A., Okoneshnikov V.S. Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
2. Sokolinskiy V.G., Sheynkman V.G. Chastotnye i fazovye modulyatory i manipulyatory [Frequency and phase modulators and manipulators]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
3. Vereshchagin E.M. i dr. Tranzistorno-varaktornyye generatory [Transistor-varactor generators] ed. by Yu.G. Nikitenko. Kiev: Tekhnika, 1979, 175 p.
4. Vereshchagin E.M. Modulyatsiya v generatorakh SVCh [Modulation in microwave generators]. Moscow: Sov. radio, 1972, 304 p.
5. Generatory i usiliteli SVCh [Microwave generators and amplifiers], ed. by I.V. Lebedeva. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 325 p.
6. Belov L.A. Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for forming microwave signals and their components: textbook]. Moscow: Izd. dom MEI, 2010, 320 p.
7. Romanyuk V.A. Analogovye ustroystva priemperedatchikov: ucheb. posobie [Analog devices of transceivers: textbook]. Moscow: Solon – Press, 2018, 144 p.
8. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Peredatchiki pomekh sovremennym sredstvam svyazi: ucheb. posobie [Transmitters of interference to modern means of communication: training manual]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 176 p.
9. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: ucheb. posobie [Fundamentals of modeling and design of radio engineering devices in Microwave Office: textbook]. Moscow: Solon-Press, 2016, 152 p.
10. Andrianov A.V., Davtyan A.D., Zikiy A.N. Generator ChM signalov [FM signal generator], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, No. 2. Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5722/).
11. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Padalko A.D. Zadayushchiy generator dlya peredatchika skol'zyashchikh pomekh [Setting generator for a sliding interference transmitter], *Sbornik nauchnykh trudov 14 mezhdunarodnoy konferentsii «Nauka Rossii: tseli i zadachi»* [Collection of scientific papers of the 14th International Conference "Science of Russia: goals and objectives"]. Part 4. Ekaterinburg: NITS «L-Zhurnal», 2019, pp. 5-8.
12. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Shutov I.I. ChM-generator s vysokoy lineynost'yu modulyatsionnoy kharakteristiki [FM-generator with high linearity of the modulation characteristic], *MNK teoreticheskikh i prikladnykh razrabotok «Nauchnye razrabotki: evraziyskiy region»* [MNC of Theoretical and Applied developments "Scientific developments: the Eurasian region"]. Moscow, 2019, pp. 111-114.

13. *Mazeev E.V., Fursaev M.A.* Proektirovanie SVCh tranzistornogo generatora s varaktor-noy perestroymoy chastoty i modelirovanie ego elektricheskikh kharakteristik [Design of a microwave transistor generator with varactor frequency tuning and modeling of its electrical characteristics], *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU], 2011, No. 3 (57), Vyp. 1, pp. 68-73.
14. *D'yakov V.P.* Monolitnye SVCh – generatory i sintezatory kompanii Hittite Microwave [Monolithic microwave generators and synthesizers of the Hittite Microwave company], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2012, No. 3, pp. 19-28.
15. *D'yakov V.P.* Sverkhshkorostnaya tverdotel'naya elektronika. T. 1. Pribory obshchego naznacheniya [Super-high-speed solid-state electronics. Vol. 1. General purpose devices]. Moscow: DMK Press, 2013, 600 p.
16. *Petukhov V.M.* Bipolyarnye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti SVCh i ikh zarubezhnye analogi [Bipolar transistors of medium and high power of microwave and their foreign analogues], *Spravochnik* [Guide]. Vol. 4. Moscow: KUBK-a, 1997, 544 p.
17. *Dzhurinskiy K.B.* Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh [Miniature coaxial radio components for microwave microelectronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 216 p.
18. *Klimachev I.I., Iovdal'skiy V.A.* SVCh GIS. Osnovy tekhnologii i konstruirovaniya [Microwave GIS. Fundamentals of technology and design], ed. by A.N. Koroleva. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 352 p.
19. *Andrei Grebennikov.* RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
20. *Ali Hajimiri, Thomas H. Lee.* The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al., 2003, 207 p.

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

**Зикий Анатолий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

**Кочубей Алексей Сергеевич** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

**Zikiy Anatoliy Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: 89896270939; Master; design engineer of the 2nd category.

УДК 528.526

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-142-154

**Д.Е. Чикрин, С.В. Голоусов**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*Технологии автономных робототехнических комплексов колесного типа становятся более востребованными в последнее время. Отдельным видом применения таких технологий является автономный беспилотный наземный транспорт. В отличие от других видов транспорта (воздушных, водных) наземным транспортным средствам требуется периодически функционировать в условиях полной автономности – при недоступности внешней связи с инфраструктурой, другими агентами транспортной сети. В таких обстановках*

*вопрос автономной навигации выходит на первое место, причем к точности позиционирования предъявляются повышенные требования, особенно в условиях антропогенной окружающей среды, например при движении в городской среде, по узким горным дорогам, тоннелям. Одной из составных частей автономной навигации часто является инерциальная сборка, состоящая из нескольких акселерометров, гироскопов, магнетометров. Для получения высокоточного навигационного решения на основе инерциальной сборки требуется качественно производить ее калибровку. Отдельным вопросом стоит автоматизация и ее стоимость для дальнейшего масштабирования необходимого для массового производства. В статье представлена теория и методика автоматизированной калибровки инерциальной навигационной системы на основе МЭМС датчиков при помощи решения оптимизационной задачи. Предложенная методика не требует высокоточного оборудования для проведения калибровки. Целью представленной работы является разработка методов и теории калибровки инерциальных блоков навигации. В статье сформулированы общие модели измерений датчиков входящих в состав инерциальной сборки, предложены методы калибровки параметров акселерометров и гироскопов зафиксированных относительно друг друга. Представлен метод автоматизации процесса калибровки, не требующий высокоточного оборудования. Представлены результаты применения разработанных методов для калибровки реальной инерциальной сборки. Представлен стенд для автоматизированной калибровки.*

*МЭМС; калибровка; акселерометр; гироскоп; оптимизация; автоматизация.*

**D.E. Chickrin, S.V. Golousov**

#### **OPTIMIZATION-BASED CALIBRATION OF MEMS NAVIGATION SYSTEM**

*Technologies of autonomous wheeled robotic systems are becoming more and more in demand lately. A separate type of application of such technology is an autonomous unmanned ground vehicle. Unlike other types of transport (air, water), ground vehicles need to periodically operate in full autonomy - when external communication with the infrastructure and other agents of the transport network is inaccessible. In such circumstances, the issue of autonomous navigation comes out on top, and increased requirements are imposed on positioning accuracy, especially in an anthropogenic environment, for example, when driving in an urban environment, along narrow mountain roads, and tunnels. One of the components of autonomous navigation is often an inertial assembly consisting of several accelerometers, gyroscopes, and magnetometers. To obtain a high-precision navigation solution based on an inertial assembly, it is required to properly calibrate it. A separate issue is automation and its cost for further scaling necessary for mass production. The article presents the theory and methodology for automated calibration of an inertial navigation system based on MEMS sensors by solving an optimization problem. The proposed technique does not require high-precision calibration equipment. The aim of the presented work is to develop methods and theory for the calibration of inertial navigation units. The article formulates general measurement models of sensors included in the inertial assembly, and proposes methods for calibrating the parameters of accelerometers and gyroscopes fixed relative to each other. The method of automation of the calibration process is presented, which does not require high-precision equipment. The results of the application of the developed methods for the calibration of a real inertial assembly are presented. A stand for automated calibration is presented.*

*Calibration; accelerometer; gyroscope; optimization; automation.*

**Введение.** Использование модулей инерциальной навигации основанных на микроэлектромеханических датчиках становится все более и более востребованным в последнее время. С ростом количества проектов по созданию беспилотного транспорта растет спрос на недорогие, точные, надежные блоки инерциальной навигации и ориентации. При этом эффективные методы автоматизации процесса калибровки датчиков, входящих в состав модуля инерциальной навигации, играют не последнюю роль.

Исследователи по всему миру занимаются вопросом калибровки акселерометров и гироскопов. Для калибровки в качестве референсных значений часто используют локальное значение гравитационного поля [1, 2]. В других работах рас-

считается использование поворотного стола, поддерживающего известную угловую скорость [3–7]. В работе [8] предложен вариант калибровки с помощью маятника. Автор [9] предлагает использовать магнитное поле в качестве референсного значения.

Для автоматизации процесса калибровки используют калибровочные стенды. Как правило они представляют собой поворотный стол с одной степенью свободы [3]. В других работах предлагают использовать двухосевой [10] или трехосевой [11] подвес.

В данной работе предлагается использовать автоматизированный стенд для калибровки блока инерциальной навигации при помощи механизма с тремя вращательными степенями свободы, при этом, в отличие от других работ [10–17], на точность движения не накладывается существенных ограничений.

**Модель измерений.** Типичная МЭМС инерциальная сборка состоит из трёх одноосевых акселерометров и гироскопов или, иначе говоря, в состав инерциальной сборки входит трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. В идеальном случае оси акселерометра взаимно перпендикулярны между собой и параллельны соответствующим осям гироскопа. Однако в действительности при производстве инерциальных датчиков невозможно добиться абсолютной перпендикулярности, в связи с этим выделяют ошибки связанные с неортогональностью осей отдельного трехосевого датчика и ошибки связанные с неколлинеарностью осей акселерометра и гироскопа.

В дополнение к вышесказанному каждый одноосевой датчик также подвержен ошибкам смещения нуля и масштабирования. Помимо этого, любые измерительные приборы подвержены шумовым воздействиям разного характера [18], калибровка которых не рассматривается в данной статье. Также в этой статье не обсуждается зависимость калибровочных параметров от температуры, так как для выявления этой зависимости требуется сложная процедура и оборудование [19, 20].

Будем считать, что значение физической величины  $\theta_{\text{ист}}$  и показания трехосевого датчика  $\theta_{\text{изм}}$  связаны соотношением:

$$\theta_{\text{изм}} = \mathbf{T}\theta_{\text{ист}} + \mathbf{b} + \mathbf{n}, \quad (1.1)$$

где  $\theta_{\text{изм}}$  – вектор  $3 \times 1$  показаний датчика,  $\theta_{\text{ист}}$  – вектор  $3 \times 1$  истинного значения физической величины,  $\mathbf{T}$  – матрица  $3 \times 3$  описывающая неортонормированность осей датчика,  $\mathbf{b}$  – вектор  $3 \times 1$  смещения нуля и  $\mathbf{n}$  – шумы датчика.

Введем систему координат  $Axyz$ , оси которой направлены по осям акселерометра и аналогично систему координат  $Gxyz$  для осей гироскопа. В дополнении к этим неортогональным системам координат введем ортогональную  $A^0xyz$  по следующим правилам:

1. ось  $x$  совместим с осью  $x$  неортогональной системы координат  $Axyz$ ;
2. ось  $y$  направим в плоскости  $xу$  неортогональной системы координат  $Axyz$ ;
3. ось  $z$  направим так, чтобы полученная система координат была правой.

Как правило, отклонения между осями ортогональной и соответствующими осями неортогональных систем координат составляет доли градуса. В этом случае вектор  $\mathbf{a}^0$  выраженный в системе координат  $A^0xyz$  приближенно в проекциях на оси системы координат  $Axyz$  можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{a} = \mathbf{S}^A \cdot \mathbf{a}^O, \quad (1.2)$$

$$\mathbf{S}^A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{xz} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yz} & 1 & \alpha_{yx} \\ \alpha_{zy} & \alpha_{zx} & 1 \end{bmatrix}$$

По построению ортогональной системы координат углы  $\alpha_{xz}$ ,  $\alpha_{xy}$ ,  $\alpha_{yx}$  равны 0. То есть:

$$\mathbf{S}^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{yz} & 1 & 0 \\ \alpha_{zy} & \alpha_{zx} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Масштабирование и смещение нуля описывается домножением на диагональную матрицу коэффициентов растяжения и прибавлением статического вектора ошибок:

$$\mathbf{M}^A = \begin{bmatrix} m_x^A & 0 & 0 \\ 0 & m_y^A & 0 \\ 0 & 0 & m_z^A \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

$$\mathbf{b}^A = \begin{bmatrix} b_x^A \\ b_y^A \\ b_z^A \end{bmatrix}$$

Аналогично для гироскопа:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{S}^G \cdot \boldsymbol{\omega}^O, \quad \mathbf{S}^G = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{xz} & \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} & 1 & \gamma_{yx} \\ \gamma_{zy} & \gamma_{zx} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

$$\mathbf{M}^G = \begin{bmatrix} m_x^G & 0 & 0 \\ 0 & m_y^G & 0 \\ 0 & 0 & m_z^G \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}^G = \begin{bmatrix} b_x^G \\ b_y^G \\ b_z^G \end{bmatrix}$$

Полная модель измерений:

$$\mathbf{a}_{\text{изм}} = \mathbf{M}^A \mathbf{S}^A \mathbf{a}_{\text{ист}} + \mathbf{b}^A + \mathbf{n}^A \quad (1.6)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{изм}} = \mathbf{M}^G \mathbf{S}^G \boldsymbol{\omega}_{\text{ист}} + \mathbf{b}^G + \mathbf{n}^G. \quad (1.7)$$

**Метод калибровки инерциальных навигационных систем.** Для полной калибровки инерциальной навигационной системы требуется определить девять калибровочных констант для акселерометра и двенадцать для гироскопа. В данной работе предлагается производить калибровку акселерометров отдельно от калибровки гироскопов, но калибровку гироскопов производить с использованием акселерометров в качестве источника референсных значений.

**Калибровка трехосевого акселерометра.** В качестве источника референсных значений для калибровки акселерометра будем использовать гравитационное поле Земли. Будем считать, что во время сбора данных в зоне проведения эксперимента гравитационное поле постоянно по направлению и значению и равно  $\mathbf{g}$ . Тогда (1.6) можно переписать в следующем виде:

$$\mathbf{g} = (\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A)^{-1} (\mathbf{a}_{\text{ИЗМ}} - \mathbf{b}^A) \quad (2.1)$$

или

$$\|\mathbf{g}\|^2 = \mathbf{g}^T \mathbf{g} = (\mathbf{a}_{\text{ИЗМ}} - \mathbf{b}^A)^T (\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A)^{-T} (\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A)^{-1} (\mathbf{a}_{\text{ИЗМ}} - \mathbf{b}^A) \quad (2.2)$$

обозначим

$$\mathbf{W} := \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} = (\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A)^{-T} (\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A)^{-1} \quad (2.3)$$

Очевидно, что матрица  $\mathbf{W}$  является симметричной, следовательно  $W_{12} = W_{21}$ ,  $W_{13} = W_{31}$ ,  $W_{23} = W_{32}$ , также:

$$\|\mathbf{g}\|^2 = \mathbf{a}_{\text{ИЗМ}}^T \mathbf{W} \mathbf{a}_{\text{ИЗМ}} - 2\mathbf{a}_{\text{ИЗМ}}^T \mathbf{W} \mathbf{b}^A + (\mathbf{b}^A)^T \mathbf{W} \mathbf{b}^A \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{g}\|^2 = & W_{11} a_{\text{ИЗМ},x}^2 + W_{22} a_{\text{ИЗМ},y}^2 + W_{33} a_{\text{ИЗМ},z}^2 + \\ & W_{12} a_{\text{ИЗМ},x} a_{\text{ИЗМ},y} + \\ & W_{13} a_{\text{ИЗМ},x} a_{\text{ИЗМ},z} + \\ & W_{23} a_{\text{ИЗМ},y} a_{\text{ИЗМ},z} \\ & - 2(W_{11} b_x^A + W_{12} b_y^A + W_{13} b_z^A) a_{\text{ИЗМ},x} \\ & - 2(W_{12} b_x^A + W_{22} b_y^A + W_{23} b_z^A) a_{\text{ИЗМ},y} \\ & - 2(W_{13} b_x^A + W_{23} b_y^A + W_{33} b_z^A) a_{\text{ИЗМ},z} \\ & + W_{11} b_x^{A2} + W_{22} b_y^{A2} + W_{33} b_z^{A2} \\ & + 2W_{12} b_x^A b_y^A + 2W_{13} b_x^A b_z^A + 2W_{23} b_y^A b_z^A \end{aligned} \quad (2.5)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha} &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_9 \quad \alpha_{10}]^T \\ \alpha_1 &= W_{11} \\ \alpha_2 &= W_{22} \\ \alpha_3 &= W_{33} \\ \alpha_4 &= W_{12} \\ \alpha_5 &= W_{13} \\ \alpha_6 &= W_{23} \\ \alpha_7 &= -2W_{11} b_x^A - 2W_{12} b_y^A - 2W_{13} b_z^A \\ \alpha_8 &= -2W_{12} b_x^A - 2W_{22} b_y^A - 2W_{23} b_z^A \\ \alpha_9 &= -2W_{13} b_x^A - 2W_{23} b_y^A - 2W_{33} b_z^A \\ \alpha_{10} &= W_{11} b_x^{A2} + W_{22} b_y^{A2} + W_{33} b_z^{A2} + \\ & 2W_{12} b_x^A b_y^A + 2W_{13} b_x^A b_z^A + \\ & 2W_{23} b_y^A b_z^A - \|\mathbf{g}\|^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}_{\text{изм}}) = \begin{bmatrix} a_{\text{изм},x}^2 \\ a_{\text{изм},y}^2 \\ a_{\text{изм},z}^2 \\ a_{\text{изм},x} a_{\text{изм},y} \\ a_{\text{изм},x} a_{\text{изм},z} \\ a_{\text{изм},y} a_{\text{изм},z} \\ a_{\text{изм},x} \\ a_{\text{изм},y} \\ a_{\text{изм},z} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

В новых обозначениях уравнение (2.5) представляется в виде:

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}_{\text{изм}})^T \boldsymbol{\alpha} = 0. \quad (2.8)$$

Для нахождения вектора  $\boldsymbol{\alpha}$  составим уравнение (2.8) для нескольких различных значений  $\mathbf{a}_{\text{изм}}$ . Объединим векторы  $\mathbf{f}(\mathbf{a}_{\text{изм}})$  в общую матрицу  $\mathbf{F}$  получим:

$$\mathbf{F}\boldsymbol{\alpha} = 0. \quad (2.9)$$

Система линейных уравнений в матричном виде (2.9) может быть решена в смысле наименьших квадратов относительно неизвестного вектора параметров  $\boldsymbol{\alpha}$  с помощью спектрального разложения матрицы  $\mathbf{F}$ .

Из (2.6) находим матрицу  $\mathbf{W}$  и вектор  $\mathbf{b}^A$ :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_4 & \alpha_5 \\ \alpha_4 & \alpha_2 & \alpha_6 \\ \alpha_5 & \alpha_6 & \alpha_3 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{b}^A = -\frac{1}{2} \mathbf{W}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_7 \\ \alpha_8 \\ \alpha_9 \end{bmatrix}$$

Последний ряд уравнения (2.6) позволяет найти амплитуду значения гравитационного поля:

$$g = \sqrt{\begin{matrix} W_{11}b_x^{A^2} + W_{22}b_y^{A^2} + W_{33}b_z^{A^2} + \\ 2W_{12}b_x^A b_y^A + 2W_{13}b_x^A b_z^A + \\ 2W_{23}b_y^A b_z^A - \alpha_{10} \end{matrix}}. \quad (2.11)$$

Поскольку собственные векторы в спектральном разложении матрицы представлены с точностью до множителя, значение  $g$  должно быть использовано для нормировки вектора  $\boldsymbol{\alpha}$ <sup>1</sup>:

$$\boldsymbol{\alpha} := \frac{1}{g^2} \boldsymbol{\alpha}. \quad (2.12)$$

<sup>1</sup> вычисления (2.10) должны быть пересчитаны после нормировки

Наконец, из (2.3) найдем:

$$\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A = \sqrt{\mathbf{W}}^{-1}. \quad (2.13)$$

**Калибровка трехосевого гироскопа.** Для нахождения  $\mathbf{b}^G$  воспользуемся тем фактом, что в неподвижном положении угловая скорость равна нулю. Также будем считать, что ошибки измерения заключенные в векторе  $\mathbf{n}^G$  имеют нулевое математическое ожидание. Тогда:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\omega}_{\text{изм},i} &= \\ \sum_{i=1}^N (\mathbf{M}^G \mathbf{S}^G \boldsymbol{\omega}_{\text{ист},i} + \mathbf{b}^G + \mathbf{n}_i^G) &= \\ \sum_{i=1}^N \mathbf{b}^G + \sum_{i=1}^N \mathbf{n}_i^G &= N \mathbf{b}^G \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $i$  – номер измерения,  $N$  – количество измерений. Следовательно:

$$\mathbf{b}^G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\omega}_{\text{изм},i}. \quad (2.15)$$

Оставшиеся девять калибровочных параметров гироскопа  $\boldsymbol{\theta}$  будем искать с помощью численной оптимизации. Пусть функция  $\Omega$  на основании последовательных измерений угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}_i$  между начальным и конечным моментами времени ( $t_n$  и  $t_k$ ) вычисляет положение системы координат в конечный момент времени относительно начального момента времени. Тогда:

$$\mathbf{a}(t_k) = \Omega([\boldsymbol{\omega}_i]_{i=1}^N) \mathbf{a}(t_n). \quad (2.16)$$

Рассмотрим непрерывный участок измерений. Пусть в моменты времени  $t_0, \dots, t_N$ , инерциальная сборка находится в состоянии покоя. Тогда:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_0 &= \mathbf{a}(t_0), \\ \mathbf{a}_0(t_k) &= \mathbf{a}(t_k), \\ \|\mathbf{a}_{\text{ист}}(t_k)\| &= \|\mathbf{g}\|, \quad k=0, \dots, N \end{aligned} \quad (2.17)$$

Определим функцию штрафа и задачу оптимизации следующим образом

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\theta}} H(\boldsymbol{\theta}), \\ H(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^N \|\mathbf{a}_0(t_k) - \mathbf{a}_{\text{ист}}(t_k)\|^2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

В качестве начальной оценки  $\boldsymbol{\theta}$  будем использовать параметры, соответствующие идеальному случаю  $\boldsymbol{\theta}_0 = [1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ .

**Описание калибровочного стенда.** Для проведения калибровки инерциальных сборок использовался стенд «Шар», разработанный в Институте Физики Казанского Федерального Университета. Стенд представляет собой подвес с тремя степенями свободы. К подвесу подведены силовые и информационные коммуникации для калибруемой инерциальной сборки. Передача данных от сборки осуществляется по RS-485. Каждая из степеней свободы подвеса управляется независимым мотором с энкодером, режимы изменения значений угловых скоростей и угловых ускорений задаются программным путем. Фотография стенда приведена на рис. 1.

Стенд оснащен специально разработанным программным обеспечением, с помощью которого можно составить программу движения отдельных моторов. В частности, можно управлять двигателями по положению, скорости, ускорению.

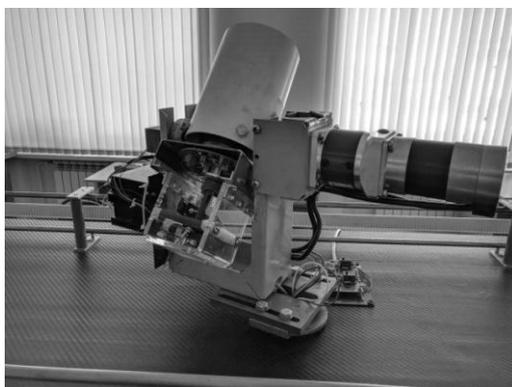


Рис. 1. Фотография стенда “Шар”

**Описание эксперимента.** Для калибровки трехосевого акселерометра входящего в состав инерциальной сборки необходимо произвести измерения ускорения в нескольких различных положениях. Множество всех положений, в которых производятся измерения обозначим за  $M$ . Для успешной калибровки всех параметров модели измерений акселерометра требуется выбирать  $M$  таким образом, чтобы оно заполняло пространство  $SO(2)$  как можно равномернее.

В данной работе предлагается использовать равномерную сетку по каждой из степеней свободы стенда. Алгоритм сбора данных для калибровки акселерометра представлен ниже, шаг сетки  $\Delta\alpha^A$  равен 20 градусам в данной работе, время сбора данных в каждой из точек  $\Delta t^A$  – 5 секундам.

1. Установить все положения моторов в нулевое положение.
2. Произвести измерения в течение  $\Delta t^A$  секунд.
3. Повернуть третий мотор на  $\Delta\alpha^A$  градусов.
4. Если текущий угол третьего мотора вернулся в нулевое положение – повернуть второй мотор на  $\Delta\alpha^A$ .
5. Если текущий угол второго мотора дошел до 180 градусов – завершить сбор данных, иначе вернуться к пункту 2.

Алгоритм сбора данных для калибровки гироскопа аналогично может быть описан следующими параметрами  $\Delta t_{вр}^G$ ,  $\Delta t_{п}^G$ ,  $N_{изм}^G$ . Параметры в данной работе равны 2 секундам, 5 секундам и 45 измерениям соответственно.

1. Установить все положения моторов в нулевое положение. Начать запись данных.
2. Случайным образом выбрать угловые скорости для всех трех моторов.
3. В течение  $\Delta t_{вр}^G$  секунд вращать моторы с рассчитанной угловой скоростью. Остановить моторы.
4. В течение  $\Delta t_{п}^G$  секунд удерживать моторы в текущем положении.
5. Если количество циклов вращений и измерений достигло  $N_{изм}^G$  – закончить запись данных, иначе вернуться к пункту 2.

Для того, чтобы убедиться, что полученные параметры калибровки датчиков не зависят от данных, на которых была произведена калибровка, будем рассматривать два набора измерений *калибровочный* и *контрольный*. Оба набора данных получаются в соответствии с алгоритмом калибровки гироскопа. Калибровочный набор данных используется для нахождения параметров калибровки, в то время как контрольный набор данных не используется для калибровки, а используется для проверки качества полученных параметров калибровки.

**Результаты калибровки.** В данной работе производилась калибровка датчиков NXP FXAS21002CQ и NXP FXOS8700CQ. В соответствии с описанной методикой были собраны данные для калибровки. Вычисленные параметры представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Калибровочные параметры акселерометра**

$\mathbf{b}^A$	$\begin{bmatrix} -0.0427 \\ 0.0241 \\ 0.0402 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}^A \mathbf{S}^A$	$\begin{bmatrix} 0.9804 & 0.0012 & 0.0055 \\ 0.0012 & 0.9727 & 0.0043 \\ 0.0055 & 0.0043 & 0.9921 \end{bmatrix}$

Таблица 2

**Калибровочные параметры гироскопа**

$\mathbf{b}^G$	$\begin{bmatrix} -0.0350 \\ 0.0042 \\ 0.0010 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}^G$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.0094 & -0.0060 \\ -0.0086 & 1 & -0.0031 \\ 0.0089 & 0.0035 & 1 \end{bmatrix}$
$\mathbf{S}^G$	$\begin{bmatrix} 0.9771 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0309 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0030 \end{bmatrix}$

На рис. 2–4 представлены графики показаний акселерометра до и после калибровки. Зеленым показаны истинные значения, полученные в результате прямого измерения ускорения покоя. Красным и синим показаны значения ускорения покоя в результате поворота начального вектора ускорения покоя на углы, полученные в результате интегрирования показаний гироскопа. Для линий красного цвета используются некалиброванные показания гироскопа, для линий синего цвета – калиброванные.

Из представленных на рис. 2–4 графиков видно, что показания гироскопов без калибровки вносят существенную ошибку в итоговое измерение ускорения. В то же время при использовании калиброванных показаний гироскопа отличие полученных данных от истинных становится незначительным.

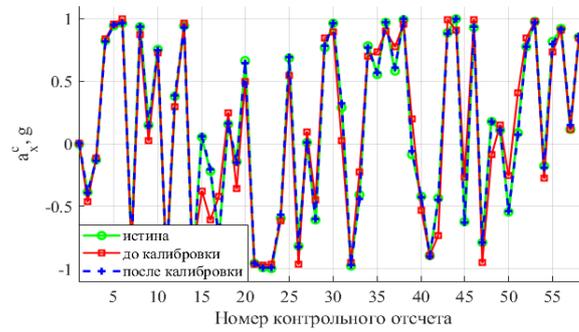


Рис. 2. Сопоставление данных для оси  $x$  акселерометра до и после калибровки акселерометра и гироскопа

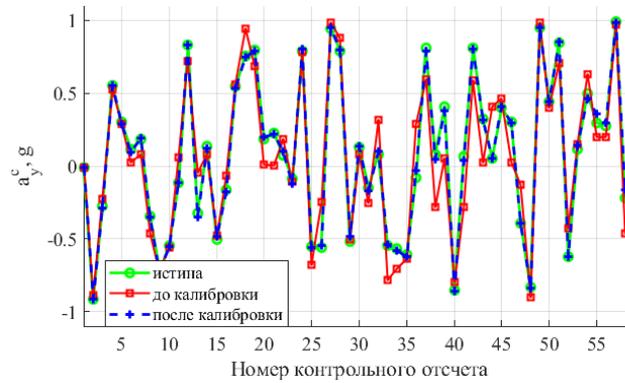


Рис. 3. Сопоставление данных для оси  $y$  акселерометра до и после калибровки акселерометра и гироскопа

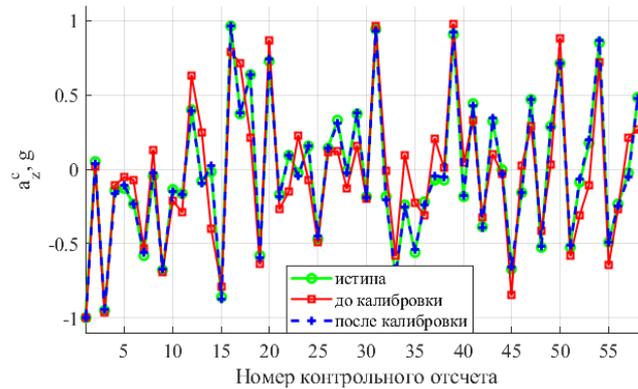


Рис. 4. Сопоставление данных для оси  $z$  акселерометра до и после калибровки акселерометра и гироскопа

**Заключение.** Авторами данной работы представлен алгоритм калибровки модулей инерциальной навигации, а также предложен способ автоматизации процесса сбора данных для калибровки. В отличие от существующих методов калиб-

ровки, использующих в качестве референсных значений известное значение угловой скорости поворотного стола, для метода предложенного в данной работе достаточно удерживать датчик в неподвижном положении. Полученные при помощи предложенного метода калибровочные параметры были проверены на контрольном наборе измерений. Полученные результаты свидетельствуют о состоятельности предложенного метода.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sipos M. et al.* Analyses of triaxial accelerometer calibration algorithms // *IEEE Sensors Journal*. – 2011. – Vol. 12, No. 5. – P. 1157-1165.
2. *Syed Z.F. [et al.]*. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems // *Measurement science and technology*. – 2007. – Vol. 18, No. 7. – P. 1897.
3. *Wang S., Meng N.* A new Multi-position calibration method for gyroscope's drift coefficients on centrifuge // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 68. – P. 104-108.
4. *Yang H. [et al.]*. A novel tri-axial MEMS gyroscope calibration method over a full temperature range // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, No. 9, pp. 3004.
5. *Jia Y. [et al.]*. Error analysis and compensation of MEMS rotation modulation inertial navigation system // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – Vol. 18, No. 5. – P. 2023-2030.
6. *Mones Z. [et al.]*. A comparative study of gravitational acceleration cancellation from on-rotor MEMS accelerometers for condition monitoring // *24th International Congress on Sound and Vibration*. – International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV, 2017.
7. *Olivares A. [et al.]*. High-efficiency low-cost accelerometer-aided gyroscope calibration // *2009 International Conference on Test and Measurement*. – IEEE, 2009. – Vol. 1. – P. 354-360.
8. *Choi K.Y., Jang S., Kim Y.H.* Calibration of inertial measurement units using pendulum motion // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. – 2010. – Vol. 11, No. 3. – P. 234-239.
9. *Wu Y., Pei L.* Gyroscope calibration via magnetometer // *IEEE Sensors Journal*. – 2017. – Vol. 17, No. 16. – P. 5269-5275.
10. *Delgado J.V. [et al.]*. Automatic calibration of low cost inertial gyroscopes with a PTU // *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. – IEEE, 2016. – P. 121-125.
11. *Madgwick S.O.H.* Automated calibration of an accelerometers, magnetometers and gyroscopes-a feasibility study // *Teche Rep, x-io Technologies Limited, Bristol, UK*. 2010.
12. *Filatov Y.V. [et al.]*. Dynamic calibration method of inertial measurement units // *Microsyst. Technol.* – 2015. – Vol. 21, No. 11. – P. 2463-2467.
13. *Hung J.C., Thacher J.R., White H.V.* Calibration of accelerometer triad of an IMU with drifting Z-accelerometer bias // *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. – IEEE, 1989. – P. 153-158.
14. *Grewal M.S., Henderson V.D., Miyasako R.S.* Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems // *29th IEEE Conference on Decision and Control*. – IEEE, 1990. – P. 3325-3334.
15. *Kim M.S., Yu S.B., Lee K.S.* Development of a high-precision calibration method for inertial measurement unit // *International journal of precision engineering and manufacturing*. – 2014. – Vol. 15, No. 3. – P. 567-575.
16. *Cheuk C.M. [et al.]*. Automatic calibration for inertial measurement unit // *2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*. – IEEE, 2012. – P. 1341-1346.
17. *Zhang R., Hoflinger F., Reind L.M.* Calibration of an IMU using 3-D rotation platform // *IEEE sensors Journal*. – 2014. – Vol. 14, No. 6. – P. 1778-1787.
18. *Литвин М.А. [и др.]*. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // *Информационные процессы*. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 326-339.
19. *El-Diasty M., El-Rabbany A., Pagiatakis S.* Temperature variation effects on stochastic characteristics for low-cost MEMS-based inertial sensor error // *Measurement Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, No. 11. – P. 3321.
20. *Niu X. [et al.]*. Fast thermal calibration of low-grade inertial sensors and inertial measurement units // *Sensors*. – 2013. – Vol. 13, No. 9. – P. 12192-12217.

## REFERENCES

1. Sipos M. et al. Analyses of triaxial accelerometer calibration algorithms, *IEEE Sensors Journal*, 2011, Vol. 12, No. 5, pp. 1157-1165.
2. Syed Z.F. [et al.]. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems, *Measurement science and technology*, 2007, Vol. 18, No. 7, pp. 1897.
3. Wang S., Meng N. A new Multi-position calibration method for gyroscope's drift coefficients on centrifuge, *Aerospace Science and Technology*, 2017, Vol. 68, pp. 104-108.
4. Yang H. [et al.]. A novel tri-axial MEMS gyroscope calibration method over a full temperature range, *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 9, pp. 3004.
5. Jia Y. [et al.]. Error analysis and compensation of MEMS rotation modulation inertial navigation system, *IEEE Sensors Journal*, 2018, Vol. 18, No. 5, pp. 2023-2030.
6. Mones Z. [et al.]. A comparative study of gravitational acceleration cancellation from on-rotor MEMS accelerometers for condition monitoring, *24th International Congress on Sound and Vibration*. International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV, 2017.
7. Olivares A. [et al.]. High-efficiency low-cost accelerometer-aided gyroscope calibration, *2009 International Conference on Test and Measurement*. IEEE, 2009, Vol. 1, pp. 354-360.
8. Choi K.Y., Jang S., Kim Y.H. Calibration of inertial measurement units using pendulum motion, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2010, Vol. 11, No. 3, pp. 234-239.
9. Wu Y., Pei L. Gyroscope calibration via magnetometer, *IEEE Sensors Journal*, 2017, Vol. 17, No. 16, pp. 5269-5275.
10. Delgado J.V. [et al.]. Automatic calibration of low cost inertial gyroscopes with a PTU, *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2016, pp. 121-125.
11. Madgwick S.O.H. Automated calibration of an accelerometers, magnetometers and gyroscopes-a feasibility study, *Tech Rep, x-io Technologies Limited, Bristol, UK. 2010*.
12. Filatov Y.V. [et al.]. Dynamic calibration method of inertial measurement units, *Microsyst. Technol.*, 2015, Vol. 21, No. 11, pp. 2463-2467.
13. Hung J.C., Thacher J.R., White H.V. Calibration of accelerometer triad of an IMU with drifting Z-accelerometer bias, *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. IEEE, 1989, pp. 153-158.
14. Grewal M.S., Henderson V.D., Miyasako R.S. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems, *29th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 1990, pp. 3325-3334.
15. Kim M.S., Yu S.B., Lee K.S. Development of a high-precision calibration method for inertial measurement unit, *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2014, Vol. 15, No. 3, pp. 567-575.
16. Cheuk C.M. [et al.]. Automatic calibration for inertial measurement unit, *2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*. IEEE, 2012, pp. 1341-1346.
17. Zhang R., Hoflinger F., Reind L.M. Calibration of an IMU using 3-D rotation platform, *IEEE sensors Journal*, 2014, Vol. 14, No. 6, pp. 1778-1787.
18. Litvin M.A. [i dr.]. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации [Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2014, Vol. 14, No. 4, pp. 326-339.
19. El-Diasty M., El-Rabbany A., Pagiatakis S. Temperature variation effects on stochastic characteristics for low-cost MEMS-based inertial sensor error, *Measurement Science and Technology*, 2007, Vol. 18, No. 11, pp. 3321.
20. Niu X. [et al.]. Fast thermal calibration of low-grade inertial sensors and inertial measurement units, *Sensors*, 2013, Vol. 13, No. 9, pp. 12192-12217.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.А. Симонова.

**Чикрин Дмитрий Евгеньевич** – Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского федерального университета; e-mail: dmitry.kfu@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: +79172727100; к.т.н.; доцент; директор.

**Голоусов Святослав Владимирович** – Институт физики Казанского федерального университета; e-mail: sgolousov@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: +79991640605; аспирант.

**Chickrin Dmitry Evgenevich** – Institute of Computer Mathematics and Information Technologies of the Kazan Federal University; e-mail: dmitry.kfu@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +79172727100; cand. of eng. sc.; associate professor; director.

**Golousov Svyatoslav Vladimirovich** – Institute of Physics of Kazan Federal University; e-mail: sgolousov@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +79991640605; graduate student.

УДК 621.371.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-154-163

**Ю.М. Мелёшин, В.И. Орешкин, К.С. Лялин****РАЗРАБОТКА АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ МИМО РАДАРА КУ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ**

*В настоящее время проводится большое количество исследований и разработок радаров непрерывного действия на основе технологии МИМО. В таких системах процесс разработки антенного полотна имеет свои особенности и отличается от разработки классических антенных решеток. Так, использование взаимно-ортогональных сигналов на передающих элементах в комбинации с оцифровкой всех приемных каналов, позволяет строить виртуальную антенную решетку путем повторения приемной антенной решетки в точках расположения передающих антенных элементов, что существенно улучшает разрешающую способность по угловым координатам, а также позволяет избавиться от дифракционных максимумов. Еще одной особенностью является обеспечение непрерывного режима работы, для этого необходимо обеспечить такой уровень пространственного запыриания сигнала между всеми передающими сигналами (при условии излучения ими взаимно-ортогональных сигналов) и приемными элементами, чтобы не происходило перенасыщение приемных трактов. В данной работе рассмотрен процесс разработки антенного полотна для МИМО радара Ku диапазона, включающий следующие этапы: расчет требований к пространственному запырианию антенных элементов, оптимизация расположения антенных элементов, электромагнитное моделирование единичного излучателя и пространственного запыриания сигналов, а также результирующих характеристик антенных элементов. В результате выбора и оптимизации расположения приемных и передающих антенных элементов была спроектирована структура из 32 передающих и 16 приемных элементов, расположенных на пространстве размером 30 на 19 см и при этом образующих виртуальную антенную решетку из 512 элементов размером 19 на 38 см. Полученная конфигурация виртуальной антенной решетки позволяет говорить о возможности ее использования в секторе работы  $\pm 60$  градусов по обоим плоскостям и о потенциальной разрешающей способности не более 1.5 на 3 градуса (по азимуту и углу места соответственно). Расчет и моделирование пространственного запыриания сигнала между передающими и приемными антенными элементами показал, что спроектированная конфигурация антенной решетки позволяет получить запыриание 66 дБ, что позволило обеспечить непрерывный режим работы без перегрузки приемных трактов.*

*Антенны; МИМО радар; турникетный излучатель; пространственное запыриание сигнала.*

**Yu.M. Meleshin, V.I. Oreshkin, K.S. Lyalin****DESIGN OF AN ANTENNA SYSTEM FOR A KU-BAND MIMO RADAR**

*There is a large amount of research and development of continuous MIMO radars. The development process of the antenna aperture for MIMO radars is different from the development of traditional antenna arrays. The use of mutually orthogonal signals on the transmitting elements in combination with the digitization of all receiving channels allows to form a virtual antenna array by repeating the receiving antenna array at the locations of the transmitting antenna elements, which significantly improves the angular resolution, and makes it possible to get rid of side lobes. It is necessary to provide a high level of spatial attenuation of the signal between all of the transmitting and all of the receiving elements, to enable continuous mode of operation, so that there is*

*no oversaturation of the receiving paths. In this paper, the process of developing an antenna aperture for a Ku-band MIMO radar is considered, including the following steps: calculating the requirements for spatial attenuation between antenna elements, optimization of antenna elements relative coordinates, electromagnetic simulation of: a single emitter, spatial attenuation of signals, and the resulting characteristics of antenna elements. As a result of the selection and optimization of the receiving and transmitting antenna elements relative coordinates, a structure of 32 transmitting and 16 receiving elements was designed with spatial dimensions of 30 by 19 cm. The formed virtual antenna array consists of 512 elements with effective spatial dimensions of 19 by 38 cm. These results promise the sector of operation of  $\pm 60$  degrees in both planes and potential resolution of no more than 1.5 by 3 degrees (azimuth and elevation, respectively). Calculation and electromagnetic simulation of spatial signal attenuation between transmitting and receiving antenna elements showed that the designed antenna array configuration allows obtaining an attenuation of 66 dB, which is consistent with the design requirements.*

*Antennas; MIMO radar; turnstile emitter; spatial signal attenuation.*

**Введение.** Для повышения пространственного разрешения, а также улучшения характеристик обнаружения, все активнее начинают внедряться МИМО радары (multiple input – multiple output – "множественный вход, множественный выход") [1–6] непрерывного излучения, основным отличием которых от хорошо известных радаров с фазированными антенными решетками является использование различных взаимно ортогональных сигналов в каждом из передающих и (или) приемных каналов. При анализе характеристик МИМО радаров одним из основных является понятие виртуальной антенной решетки, направленные свойства которой определяют угловое разрешение системы [7–8]. Виртуальность антенной решетки заключается в том, что пространственная обработка в вычислителе осуществляется по массиву антенных элементов, количество которых равно произведению реальному количеству приемных элементов на количество передающих. Использование многоканальной системы приводит к получению в приёмниках отражённых сигналов от цели для различных сигналов, что эквивалентно увеличению числа элементов в антенной решётке и позволяет повысить угловое разрешение радара. Различные конфигурации размещения элементов позволяют не только изменить характеристики виртуальной антенной решётки, но и добиться наилучшего пространственного запирания сигнала, проникающего с передающих на приемные элементы, что является крайне важным для обеспечения непрерывного режима работы [9].

В данной работе представлены результаты исследования конфигурации расположения элементов МИМО радара при следующих начальных условиях:

- ◆ центральная частота: 14 ГГц;
- ◆ угловое разрешение по азимуту и углу места: 1.5 на 3 градуса ( $\Delta\theta_{(a,p)}$ );
- ◆ сектор работы по азимуту и углу места  $\pm 60$  градусов ( $\theta_s$ );
- ◆ обеспечение необходимого для непрерывного режима работы пространственного запирания сигнала, проникающего с передающих на приемные элементы.

**Расчёт виртуальной антенной решетки.** Виртуальная антенная решётка (ВАР) образована по принципу повторения приемной антенной решетки в точках расположения передающих элементов [10–13]. На основании требований к угловому разрешению были получены минимальные геометрические размеры ВАР:

$$L_{(x,y)} = \frac{51^\circ \cdot \lambda}{2 \cdot \Delta\theta_{(a,p)}}. \quad (1)$$

Угловым разрешениям 1.5 и 3 градуса по азимуту и углу места соответствуют минимальные размеры ВАР 36.38 на 18.19 см. Максимальный межэлементный шаг  $d_{max}$  ВАР, рассчитывается с учетом предполагаемого оценочного подавления дифракционного максимума диаграммой направленности единичного излучателя (значение  $\theta_d$ ):

$$d_{max} \leq \frac{\lambda}{\sin \theta_d + \sin \theta_s},$$

При описанных выше начальных условиях  $d_{max}$  равен 1.17 см.

В соответствии с описанными выше ограничениями, и принимая во внимание удобство проектирования модулей число каналов которых кратно  $2^n$ , где  $n$  – натуральное число, оптимальной является конфигурация ВАР в виде прямоугольной эквидистантной антенной решетки 16 на 32 элемента (512 виртуальных элементов). Было выбрано разделение на 32 передающих и 16 приемных элементах ввиду того, что увеличение приемных элементов приведет к значительному увеличению потока данных между модулем оцифровки и центральным вычислителем системы. Данная конфигурация конструктивно может быть реализована различными способами, в рамках данного исследования рассмотрено три варианта размещения приемных и передающих модулей, представленных на рис. 1.

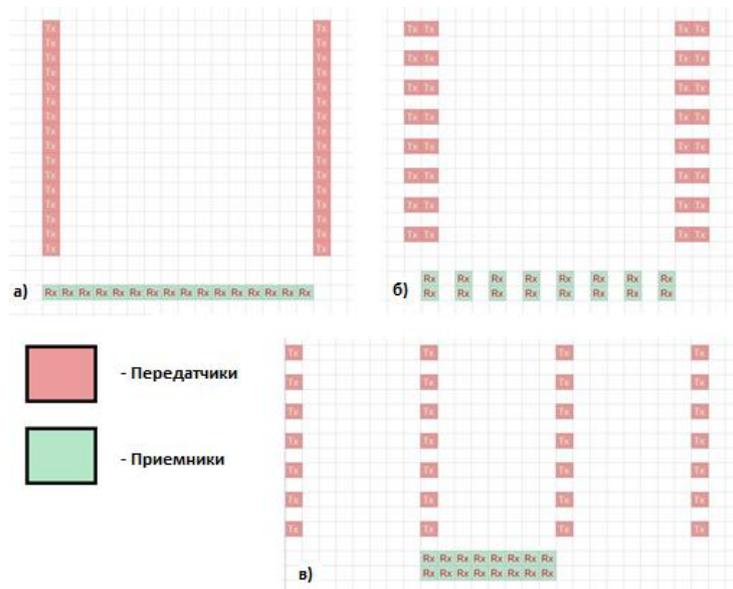


Рис. 5. Варианты расположения приемных и передающих элементов

К достоинствам конфигурации «а» можно отнести удобство линейного расположения модулей и возможность использования одного СВЧ-слоя при проектировании печатной платы, а также отсутствие ограничений на высоту модулей. При этом возникает сложность при конструировании антенной решётки из-за небольшого межэлементного расстояния между излучателями в рамках каждой из линейных решеток.

При использовании конфигураций «б» и «в» наибольшее затруднение представляет необходимость близкого размещения элементов в двухслойных ПРМ («б» и «в») и ПРД («б») модулях. Несмотря на это, достоинством конфигурации «с» является большое расстояние между ПРД элементами, в связи с чем, возможно использование ПРД элементов высокой мощности, а также при проектировании передающих модулей проще реализовать теплоотвод с передающих каналов. Также, в конфигурациях «а» и «б» общая площадь, которую занимают антенные элементы существенно меньше по сравнению с конфигурацией «в».

В рамках представленного проекта планируется использовать маломощные ПРД элементы, а также важным является наименьшая номенклатура составных частей, поэтому оптимальной была выбрана конфигурация «а» [14].

**Оценка требований к пространственному запираению сигнала.** Одной из важных задач данной работы являлось обеспечение необходимого минимального уровня пространственного запираения сигнала между передающими и приемными элементами для обеспечения возможности непрерывного режима работы. Данное требование зависит от двух основных величин: динамического диапазона и минимальной чувствительности приемного устройства. Ввиду того, что в ММО радаре каждый приемный канал оцифровывается независимо, данные параметры напрямую определяются характеристиками одного приемного канала. В этом случае предполагаемый динамический диапазон приемного тракта равен 75 дБ, тогда как минимальная чувствительность равна минус 98 дБм [15–17]. Следовательно, с учетом запаса в 2 значащих бита (12 дБ) аналогово-цифрового преобразователя, конфигурация решетки должна обеспечивать такое запираение, чтобы на каждый приемный модуль суммарная мощность сигнала на входе каждого приемного элемента была не более минус 35 дБм. Это требование будет являться основным критерием для электродинамического моделирования.

**Электродинамическое моделирование единичного излучателя.** В качестве единичного излучателя был выбран симметричный турникетный излучатель с круговой поляризацией. Такой тип излучателя обладает стабильным коэффициентом усиления в большом секторе сканирования, имеет относительно малые геометрические размеры в плоскостях расположения элементов, что позволяет размещать их с малым межэлементным шагом [18–19]. Так как в разрабатываемом антенной решетке межэлементное расстояние очень мало, то одной из задач моделирования было учесть взаимные влияния излучателей при подборе оптимальных размеров излучателя. Внешний вид проводников с основными размерами представлен на рис. 2.

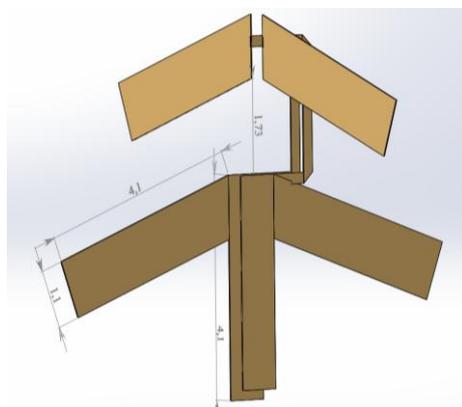


Рис. 6. Внешний вид проводников единичного излучателя

Конструктивно представленный излучатель представляет собой пересечение двух печатных плат из материала Rogers 4350В толщиной 0.25 мм. В таком случае антенная решетка строится в виде одной общей длинной печатной платы и отдельно изготавливаемых печатных плат, устанавливаемых перпендикулярно. Общая компоновка излучателей с измененной прозрачностью диэлектрика двух центральных секций показана на рис. 3.

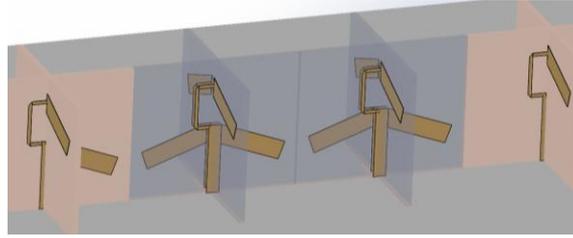


Рис. 7. Общая компоновка излучателей

Результаты моделирования единичного излучателя с учетом влияния соседних элементов на центральной частоте (14 ГГц) представлены на рис. 4. Показаны зависимости коэффициента усиления ( $K_u$ ) от угла места с учетом потерь на эллиптичность поляризации излучателя (ответный излучатель принимается за элемент с идеальной круговой поляризацией) для двух перпендикулярных сечений (при угле азимута 0 и 90 градусов).

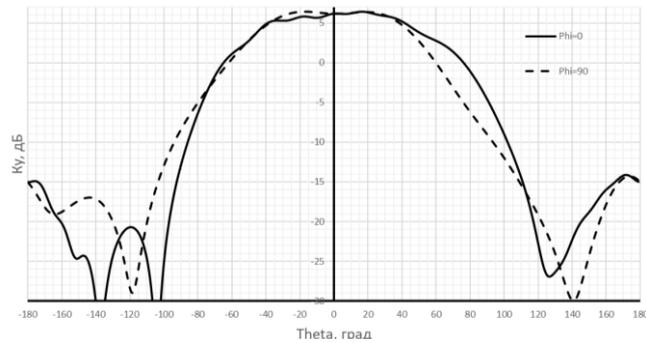


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления от угла места для двух сечений

Как видно из представленных данных, в секторе работы  $\pm 40$  градусов  $K_u$  не менее 4 дБ, а в секторе  $\pm 60$  градусов не менее 0 дБ, что удовлетворяет задачам данного исследования.

**Электродинамическое моделирование пространственного записания сигнала.** Для проверки уровня пространственного подавления было проведено электродинамическое моделирование приёмной и передающих решеток, конфигурация их расположения описана ранее. В качестве одиночного антенного элемента использовался описанный ранее излучатель. Для обеспечения дополнительного записания был спроектирован и введен в конструкцию специальный бортик, разделяющий приемную и передающие части радара [20]. Общий вид антенного полотна радара представлен на рис. 5.

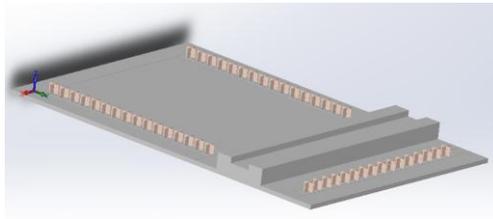


Рис. 9. Общий вид антенного полотна радара

По представленным результатам видно, что все антенное полотно занимает площадку размером 30 на 19 см при размере ВАР 19 на 38 см.

Известно, что выходная мощность каждого излучателя составляет 30 дБм, и при этом все излучаемые сигналы являются ортогональными с случайной начальной фазой. На основании этого, расчет принимаемой мощности на каждом приемном элементе выполнялся следующим образом:

1. Рассчитывался комплексный коэффициент передачи между каждым передатчиком и одним приемником.

2. Полученные коэффициенты умножались на выходную мощность каждого излучателя со случайной начальной фазой.

Принятая мощность на каждом приемном излучателе являлась основным критерием, по которому далее проводилась оптимизация расположения приемной решетки и геометрической структуры разделяющего бортика. Полученные значения суммарной мощности для худшего случая были пересчитаны в коэффициент пространственного запыриания  $S$  с учетом задаваемой в модели мощности с каждого передающего излучателя. Полученные значения в зависимости от частоты представлены на рис. 6.

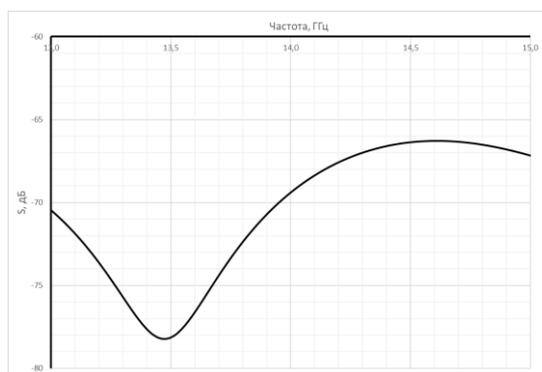


Рис. 10. Коэффициент пространственного запыриания зависимости от частоты

По представленным данным видно, что коэффициент пространственного запыриания для заданного рабочего диапазона частот 13–15 ГГц не превышает минус 66 дБ, что с учетом фиксированной мощности излучения не более 1 Вт с каждого излучателя (+30 дБм) соответствует принимаемой мощности на каждом излучателе не более минус 36 дБм.

**Заключение.** В данной статье представлены результаты исследования, посвященного разработке антенного полотна ММО радара Ку диапазона частот. В результате выбора и оптимизации расположения приемных и передающих антенных элементов была спроектирована структура из 32 передающих и 16 приемных элементов, расположенных на пространстве размером 30 на 19 см и при этом образующих виртуальную антенную решетку из 512 элементов размером 19 на 38 см.

Полученная конфигурация виртуальной антенной решетки позволяет говорить о возможности ее использования в секторе работы  $\pm 60$  градусов и о потенциальной разрешающей способности не более 1.5 на 3 градуса. Результаты моделирования спроектированного единичного излучателя (с учетом конструктивного исполнения и влияния соседних излучателей) показали, что коэффициент усиления излучателя не менее 0 дБ в секторе работы  $\pm 60$  градусов (и не менее 4 дБ в секторе работы  $\pm 40$  градусов).

Моделирование пространственного записи сигнала от передающих излучателей к приемным показало записи не менее 66 дБ, что позволило обеспечить непрерывный режим работы без перегрузки приемных трактов.

На основании этого сделаны выводы о успешном достижении требуемых величин и о дальнейшем использовании представленной структуры антенной системы ММО радара. В будущем планируется изготовление разработанной антенной системы, экспериментальное подтверждение результатов моделирования и использование разработанной антенной системы в составе ММО радара.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chernyak V.S.* On a new direction in radar: MIMO radar // *Applied Radioelectronics*. – 2009. – Vol. 8, No. 4. – P. 477-489.
2. *Simon Kueppers, Harun Cetinkaya, Reinhold Herschel, Nils Pohl.* A Compact  $24 \times 24$  Channel MIMO FMCW Radar System Using a Substrate Integrated Waveguide-Based Reference Distribution Backplane // *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on*. – 2020. – Vol. 68, No. 6. – P. 2124-2133.
3. *Sit Y.L., Li G., Manchala S., Afrasiabi H., Sturm C. and Lübbert U.* BPSK-based MIMO FMCW Automotive-Radar Concept for 3D Position Measurement // *Radar Conference (EuRAD) 2018. European, 2018*.
4. *Крючков И.В., Слукин Г.П., Чапурский В.В.* Пространственно-временная обработка сигналов на выходе ММО антенной системы с учетом переотражений от земной поверхности // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. – 2020. – № 1-1. – С. 531-532.
5. *Чапурский В.В., Филатов А.А., Водозадов Р.В.* К вопросу о выборе системы координат при построении пространственной обобщенной функции неопределенности для радиолокационных систем типа ММО // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. – 2020. – № 1-1. – С. 533-534.
6. *Чапурский В.В., Слукин Г.П., Нониашвили М.И., Лесников Г.А.* Разрешающая способность и радиолокационные изображения стационарных объектов в наземных ММО-радиолокационных системах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*. – 2019. – № 3 (126). – С. 77-94. – Doi: 10.18698/0236-3933-2019-3-77-94.
7. *Liu Y., Liao G. and Yang Z.* Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems // *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*. – 2016. – P. 1-4. – Doi: 10.1109/RADAR.2016.8059539.
8. *Touati N. et al.* High Angle Resolution Automotive Radar Based on Simultaneous 12Tx Doppler-Multiplex MIMO // *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*. – 2021. – P. 386-389. – Doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00105.
9. *Charles E. Cook Marvin Bernfeld.* Radar signals. An introduction to theory and application. – Academic press, inc. (London) LTD, 1967.
10. *Лобач В.Т., Касьянов А.О., Потупак М.В. [и др.]* Последовательный способ формирования каналов ММО при измерении параметров радиолокационных объектов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 11 (172). – С. 213-224.
11. *Зайцев Н.А., Макарецкий Е.А.* Анализ направленных свойств антенных решеток ММО РЛС // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2016. – № 12-2. – С. 111-121.
12. *Чапурский В.В.* Получение радиолокационных изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*. – 2011. – № 4 (85). – С. 72-91.
13. *Hassani A. and Vorobyov S.A.* Why the phased-MIMO radar outperforms the phased-array and MIMO radars // *2010 18th European Signal Processing Conference, Aalborg, Denmark, 2010*. – P. 1234-1238.
14. *Meleshin Y.M., Romanova E.O., Zatonkaya A.A., Kuzmin I.A. and Airapetian A.A.* Optimization of the Arrangement of Antenna Elements of the Ku-band MIMO Radar // *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. – 2021. – P. 2541-2543. – Doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396418.

15. Zheng Shenghua, Xu Dazhuan and Jin Xueming. ADC limitations on the dynamic range of a digital receiver // 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – 2005. – Vol. 1. – P. 79-82. – Doi: 10.1109/MAPE.2005.1617852.
16. Tangelder R.J.W.T., H. de Vries, Rosing R., Kerkhoff H.G. and Sachdev M. Jitter and decision-level noise separation in A/D converters // IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309). – 1999. – Vol. 3. – P. 1558-1562. – Doi: 10.1109/IMTC.1999.776087.
17. Jianhua Liu, Xiyuan Zhou and Yingning Peng. Spectral arrangement and other topics in first-order bandpass sampling theory // in IEEE Transactions on Signal Processing. – June 2001. – Vol. 49, No. 6. – P. 1260-1263. – Doi: 10.1109/78.923308.
18. Ефимов А.Г., Корнеев С.А., Матвеев В.С., Чистюхин В.В. Проектирование многолучевой приемо-передающей апертуры низкоорбитальной космической системы связи // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 64-73.
19. Патент № 2728729 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 21/26. Турникетная антенна с малогабаритным квадратурным делителем мощности: № 2019119473: заявл. 20.06.2019 : опубл. 30.07.2020 / Московский А.В., Осокин В.А.; заявит.: Закрытое акционерное общество "МНИТИ" (ЗАО "МНИТИ").
20. Чистюхин В.В., Лялин К.С., Орешкин В.И. [и др.]. Проектирование излучающей апертуры АФАР самолетной РЛС переднего обзора для системы наведения и посадки в автоматическом режиме // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20, № 5. – С. 530-535.

## REFERENCES

1. Chernyak V.S. On a new direction in radar: MIMO radar, *Applied Radioelectronics*, 2009, Vol. 8, No. 4, pp. 477-489.
2. Simon Kuipers, Harun Cetinkaya, Reinhold Herschel, Nils Pohl. A Compact  $24 \times 24$  Channel MIMO FMCW Radar System Using a Substrate Integrated Waveguide-Based Reference Distribution Backplane, *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on*, 2020, Vol. 68, No. 6, pp. 2124-2133.
3. Sit Y.L., Li G., Manchala S., Afrasiabi H., Sturm C. and Lübbert U. BPSK-based MIMO FMCW Automotive-Radar Concept for 3D Position Measurement, *Radar Conference (EuRAD) 2018*. European, 2018.
4. Kryuchkov I.V., Slukin G.P., Chapurskiy V.V. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov na vykhode MIMO antennoy sistemy s uchetom pereotrazheniy ot zemnoy poverkhnosti [Spatio-temporal signal processing at the MIMO output of an antenna system taking into account re-reflections from the Earth's surface], *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii* [Microwave equipment and telecommunications technologies], 2020, No. 1-1, pp. 531-532.
5. Chapurskiy V.V., Filatov A.A., Vodolazov R.V. K voprosu o vybere sistemy koordinat pri postroenii prostranstvennoy obobshchennoy funktsii neopredelennosti dlya radiolokatsionnykh sistem tipa MIMO [On the question of choosing a coordinate system when constructing a spatial generalized uncertainty function for radio-location systems of the MIMO type], *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii* [Microwave equipment and telecommunications technologies], 2020, No. 1-1, pp. 533-534.
6. Chapurskiy V.V., Slukin G.P., Noniashvili M.I., Lesnikov G.A. Razreshayushchaya sposobnost' i radioizobrazheniya statsionarnykh ob"ektov v nazemnykh MIMO-radiokamerakh [Resolution and radio images of stationary objects in ground-based MIMO-radio cameras], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument making"], 2019, No. 3 (126), pp. 77-94. Doi: 10.18698/0236-3933-2019-3-77-94.
7. Liu Y., Liao G. and Yang Z. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems, *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*, 2016, pp. 1-4. Doi: 10.1109/RADAR.2016.8059539.

8. *Touati N. et al.* High Angle Resolution Automotive Radar Based on Simultaneous 12Tx Doppler-Multiplex MIMO, *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*, 2021, pp. 386-389. Doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00105.
9. *Charles E. Cook Marvin Bernfeld.* Radar signals. An introduction to theory and application. Academic press, inc. (London) LTD, 1967.
10. *Lobach V.T., Kas'yanov A.O., Potipak M.V. [i dr.]*. Posledovatel'nyy sposob formirovaniya kanalov MIMO pri izmerenii parametrov radiolokatsionnykh ob"ektov [A sequential method for forming MIMO channels when measuring the parameters of radar objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 213-224.
11. *Zaytsev N.A., Makaretskiy E.A.* Analiz napravlennykh svoystv antennoykh reshetok MIMO RLS [Analysis of directional properties of MIMO radar antenna arrays], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2016, No. 12-2, pp. 111-121.
12. *Chapurskiy V.V.* Poluchenie radiologograficheskikh izobrazheniy ob"ektov na osnove razrezhenykh antennoykh reshetok tipa MIMO s odnochastotnym i mnogochastotnym izlucheniem [Obtaining radiographic images of objects based on sparse MIMO-type antenna arrays with single-frequency and multi-frequency radiation], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument making"], 2011, No. 4 (85), pp. 72-91.
13. *Hassanien A. and Vorobyov S.A.* Why the phased-MIMO radar outperforms the phased-array and MIMO radars, *2010 18th European Signal Processing Conference, Aalborg, Denmark, 2010*, pp. 1234-1238.
14. *Meleshin Y.M., Romanova E.O., Zatonskaya A.A., Kuzmin I.A. and Airapetian A.A.* Optimization of the Arrangement of Antenna Elements of the Ku-band MIMO Radar, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021, pp. 2541-2543. Doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396418.
15. *Zheng Shenghua, Xu Dazhuan and Jin Xueming.* ADC limitations on the dynamic range of a digital receiver, *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2005, Vol. 1, pp. 79-82. Doi: 10.1109/MAPE.2005.1617852.
16. *Tangelder R.J.W.T., H. de Vries, Rosing R., Kerckhoff H.G. and Sachdev M.* Jitter and decision-level noise separation in A/D converters, *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309)*, 1999, Vol. 3, pp. 1558-1562. Doi: 10.1109/IMTC.1999.776087.
17. *Jianhua Liu, Xiyuan Zhou and Yingning Peng.* Spectral arrangement and other topics in first-order bandpass sampling theory, in *IEEE Transactions on Signal Processing*, June 2001, Vol. 49, No. 6, pp. 1260-1263. Doi: 10.1109/78.923308.
18. *Efimov A.G., Korneev S.A., Matveev V.S., Chistyukhin V.V.* Proektirovanie mnogoluchevoy priemo-peredayushchey apertury nizkoorbital'noy kosmicheskoy sistemy svyazi [Designing a multipath receiving-transmitting aperture of a low-orbit space communication system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2021, Vol. 26, No. 1, pp. 64-73.
19. *Moskovskiy A.V., Osokin V.A.* Patent № 2728729 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H01Q 21/26. Turniketnaya antenna s malogabaritnym kvadraturnym delitelem moshchnosti [Turnstile antenna with a small-sized quadrature power divider]: No. 2019119473: appl.: 20.06.2019; publ. 30.07.2020; applicant: CJSC "MNITI.
20. *Chistyukhin V.V., Lyalin K.S., Oreshkin V.I. [i dr.]*. Proektirovanie izluchayushchey apertury AFAR samoletnoy RLS perednego obzora dlya sistemy navedeniya i posadki v avtomaticheskom rezhime [Designing of the radiating aperture of the AFAR of the forward-looking aircraft radar for the guidance and landing system in automatic mode], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2015, Vol. 20, No. 5, pp. 530-535.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Г. Ефимов.

**Мелёшин Юрий Михайлович** – МПСУ НИУ МИЭТ; e-mail: kykymberr@gmail.com; г. Москва, г. Зеленоград, Россия; тел.: +79057730697; к.т.н.; доцент.

**Орешкин Виталий Иванович** – e-mail: oreshkinvi@gmail.com; тел.: +74997101029; к.т.н.; доцент.

**Лялин Константин Сергеевич** – e-mail: kslyalin@gmail.com; тел.: +74997101029; к.ф.-м.н.; зам. директора.

**Meleshin Yury Mikhailovich** – Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology; e-mail: kykymberr@gmail.com; Zelenograd, Moscow, Russia; phone: +79057730697; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Oreshkin Vitaly Ivanovich** – e-mail: oreshkinvi@gmail.com; phone: +74997101029; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Lyalin Konstantin Sergeevich** – e-mail: kslyalin@gmail.com; phone: +74997101029; cand. of phys. and math. sc.; Vice-director.

## Раздел IV. Моделирование процессов и систем

УДК 681.3:519.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-164-172

**А.И. Приходченко**

### **ВЫБОР СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ СОГЛАСИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РАНГОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*Цель работы – выбор статистически оптимального алгоритма принятия решения о наличии или отсутствии сигнала для ранговой обработки сигнала при решении задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности. Задачи исследования: 1) анализ алгоритма принятия решения, приведенного в открытых источниках для ранговых процедур; поиск его недостатков; 2) выбор и обоснование оптимального (в статистическом смысле) алгоритма принятия решения для использования в ранговой обработке сигналов; 3) проведение эксперимента по получению характеристик выбранного алгоритма принятия решения; 4) анализ полученных результатов. Предложена модель обработки сигналов на фоне действия помех в условиях априорной неопределенности. Модель состоит из рангового обнаружителя и решающего устройства, сравнивающего эмпирическое распределение рангов с теоретическим. Ранговый обнаружитель позволяет свести задачу обнаружения сигнала на фоне помех с неизвестным распределением к задаче проверки простой гипотезы относительно распределения рангов. Решающее устройство основано на использовании непараметрического критерия Согласия Ватсона, имеющего высокую мощность (вероятность не совершить ошибку второго рода – пропуск сигнала). Использование предлагаемого подхода к решению задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности обеспечивает следующие характеристики системы: 1) использование ранговых процедур обеспечивает нечувствительность параметров системы обнаружения к изменяющимся параметрам сигналов и помех; 2) выбранный алгоритм принятия решения обеспечивает приемлемые характеристики системы в условиях существенной априорной неопределенности. Предлагаемый подход к решению задачи обнаружения может найти место во многих научных областях, где имеет место быть априорная неопределенность. Например, в радиолокации, гидролокации, связи, медицине и других областях науки и техники.*

*Априорная неопределенность; ранги; критерии согласия; равномерное распределение.*

**A.I. Prikhodchenko**

### **SELECTION OF A STATISTICALLY OPTIMAL CRITERION FOR THE AGREEMENT OF A UNIFORM DISTRIBUTION FOR RANK SIGNAL PROCESSING UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY**

*The aim of the work is to choose a statistically optimal algorithm for making a decision about the presence or absence of a signal for rank signal processing when solving the detection problem under conditions of a priori uncertainty. Research objectives: 1) analysis of the decision-making algorithm given in open sources for ranking procedures; search for its shortcomings; 2) selection and justification of the optimal (in the statistical sense) decision-making algorithm for use in rank signal processing; 3) conducting an experiment to obtain the characteristics of the selected decision-making algorithm; 4) analysis of the results obtained. A model of signal processing against the background of interference in conditions of a priori uncertainty is proposed. The model consists of a rank detector and a solver that compares the empirical distribution of ranks with the theoretical one. The rank detector allows you to reduce the problem of detecting a*

signal against the background of interference with an unknown distribution to the problem of testing a simple hypothesis about the distribution of ranks. The decision device is based on the use of a nonparametric Watson Consensus criterion, which has a high power (the probability of not making a second – kind error – skipping a signal). The use of the proposed approach to solving the detection problem under conditions of a priori uncertainty provides the following characteristics of the system: 1) the use of rank procedures ensures that the parameters of the detection system are insensitive to changing parameters of signals and interference; 2) the chosen decision-making algorithm provides acceptable characteristics of the system under conditions of significant a priori uncertainty. The proposed approach to solving the detection problem can find a place in many scientific fields where there is a priori uncertainty. For example, in radar, sonar, communications, medicine and other fields of science and technology.

*Prior uncertainty; ranks; goodness-of-fit criteria; uniform distribution.*

**Введение.** Решение задачи обнаружения, различения и оценивания сигналов в условиях априорной неопределенности – довольно актуальная проблема при проектировании микроэлектронных вычислительных систем. Суть этой проблемы заключается в том, что при построения информационных систем в соответствии с классической теорией статистического синтеза, требуемого объема априорной информации о параметрах сигналов и помех, как правило нет.

Решение этой проблемы идет по нескольким направлениям [1, 11–18]: 1) адаптивное, заключающаяся в автоматической подстройке системы к изменяющимся параметрам сигнала и помехи; 2) непараметрическое, которое сводится к обеспечению нечувствительности системы к изменениям параметров сигналов и помех. Адаптация применяется, когда неизвестна небольшая совокупность параметров сигналов и помех. В целом, адаптивные алгоритмы – это те же оптимальные алгоритмы с изменяющейся структурой системы. Если же число неизвестных параметров велико, то адаптация неэффективна, и тогда применяют непараметрические методы. В связи с этим, непараметрические методы представляют наибольший интерес.

В электронных системах обнаружения сигналов стали применяться непараметрические методы в связи с проблемой стабилизации частоты ложных срабатываний обнаружителей при неконтролируемом изменении свойств помехи. Поэтому, в технической литературе методы стабилизации уровня ложных тревог с неизвестным законом распределения помех называются непараметрическими.

Непараметрические алгоритмы предполагают некоторое инвариантное преобразование  $S$  массива выборочных значений  $X$ . В результате образуется новый массив  $Z = S(X)$ , распределение элементов которого при отсутствии сигнала точно известно. Преобразование  $S(X)$ , позволяет свести задачу обнаружения сигнала на фоне помех с неизвестным распределением к задаче проверки простой гипотезы относительно распределения  $Z$ .

Синтез непараметрических обнаружителей выполняется в два этапа [1]: 1) выбирают вид инвариантного преобразования  $S(X)$ , 2) выбирают способ обработки преобразованных данных.

Процедура ранжирования, заключающаяся в преобразовании выборочных значений входных сигналов в последовательность целых чисел – рангов, имеет широкие инвариантные свойства. Ранги обладают множеством свойств, которые полезны на практике. Теория ранговых методов является наиболее глубоко разработанной и лучше всего подготовленной для практической реализации по сравнению с непараметрическими методами других классов.

**Ранги.** Рангом  $i$ -го элемента  $x_i$  массива выборочных значений  $X$  называется порядковый номер  $R_i$  этого элемента в вариационном ряду, т.е.

$$x_i = x^{(R_i)}. \quad (1)$$

Процедуру вычисления ранга можно представить в виде:

$$R_i = \sum_{k=1}^n \operatorname{sgn}(x_i - x_k). \quad (2)$$

Совокупность рангов  $\{R_1, \dots, R_n\}$  всех элементов выборки  $\{x_1, \dots, x_n\}$  образует некоторую перестановку целых чисел от 1 до  $n$ . Все такие перестановки равновероятны. Поэтому, независимо от конкретного закона распределения исходной выборки  $\{x_1, \dots, x_n\}$  совместное распределение рангов  $\{R_1, \dots, R_n\}$  является равномерным:

$$p(R_1, \dots, R_n) = \frac{1}{n!}. \quad (3)$$

Судить о наличии сигнала во входном процессе можно по изменению равномерного распределения рангов.

После того как выбран вид преобразования входных данных, необходимо определиться в выборе вида тестовой статистики  $U(Z)$  относительно преобразованных значений  $Z = S(X)$ .

Данная задача ближе к классической постановке, чем исходная, так как в результате преобразования  $S(X)$  испытуемая непараметрическая гипотеза относительно массива  $X$  преобразуется в простую гипотезу относительно известного распределения массива  $Z$ . Однако альтернативная гипотеза при этом остается непараметрической, т.е. при наличии сигнала вид распределения  $Z$  неизвестен. Поэтому оптимальных (в классическом смысле) статистик  $U(Z)$ , обеспечивающих наилучшее качество обнаружения для всего множества альтернативных распределений, обычно не существует.

Допустим имеются отсчеты входной выборки  $X: \{x_1, \dots, x_n\}$ , и имеются некоторые дополнительные отсчеты  $Y: \{y_1, \dots, y_m\}$ , соответствующие чистой помехе. Тогда распределение помехи можно оценить по этой опорной выборке. В результате имеем алгоритм оценивания распределения помехи

$$\hat{p} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \operatorname{sgn}(x - y_k). \quad (4)$$

Выражение для определения рангов примет вид:

$$R_i = \sum_{k=1}^m \operatorname{sgn}(x_i - y_k). \quad (5)$$

При таком определении рангов любое изменение распределения выборки  $X$  по сравнению с выборкой  $Y$  приводит к нарушению равномерного закона распределения рангов. В данном случае это является признаком наличия сигнала. Алгоритм (5) называют алгоритмом ранжирования по общей опорной выборке в отличие от алгоритма (2), который называют алгоритмом ранжирования без опорной выборки.

В литературе часто используют определение ранга, представляющее собой сумму выражений (2) и (5):

$$R_i = \sum_{l=1}^n \operatorname{sgn}(x_i - x_l) + \sum_{k=1}^m \operatorname{sgn}(x_i - y_k), \quad (6)$$

которое называют алгоритмом ранжирования составной выборки  $\{x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m\}$ . Его достоинство по сравнению с алгоритмом (5) – сохранение информации о соответствии уровней между сигнальными отсчетами, что имеет значение, например, в задачах измерения параметров сигнала.

Гибкость процедуры ранжирования обеспечивает возможность решения широкого круга задач обнаружения сигналов в условиях непараметрической априорной неопределенности. Ранжирование обладает уникальной особенностью по сравнению с другими непараметрическими методами, позволяющее после преобразования полностью восстановить исходную информацию о сигнале. Применение рангов не только обеспечивает решение задачи стабилизации ложных тревог, но и позволяет достичь высокой эффективности обнаружения.

**1. Постановка задачи.** Рассматривается задача обнаружения сигнала (обозначим его как  $s(t)$ ) на фоне стационарной помехи (обозначим ее как  $y(t)$ ) в условиях существенной априорной неопределенности. Известны лишь общие признаки наличия или отсутствия сигнала во входной выборке.

На вход обнаружителя поступают входные данные  $x(t)$ , представленные в виде массива выборочных значений  $X: \{x_1, \dots, x_n\}$ . Также предполагаются известными входные данные, соответствующие чистой помехе  $y(t)$ , которые также представлены выборочными значениями  $Y: \{y_1, \dots, y_m\}$ . Выберем  $n = m = 200$  отсчетов.

Рассматривается аддитивное взаимодействие помехи и сигнала  $x(t) = s(t) + y(t)$ . Необходимо выбрать такой алгоритм обработки, который бы имел максимальную вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги. Зададим следующие значения вероятности ложной тревоги:  $P_{лт} = 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}$ . Также зададим отношение сигнал/помеха на входе обнаружителя:  $c/\text{ш} = -20 \text{ dB}, -6 \text{ dB}, -3 \text{ dB}, 0 \text{ dB}$ .

При моделировании в качестве полезного сигнала использована гармоническая функция, так как в данном случае нас интересуют не параметры сигнала, а характеристики обнаружителя.

**2. Выбор и обоснование критерия согласия проверки равномерного распределения.** Алгоритм, по которому проводится решение о наличии или отсутствии сигнала, предлагаемый в открытых источниках, основан на подсчете количества рангов, превысивших порог. Поэтому его главным недостатком является ограниченный диапазон возможных уровней ложных тревог, поскольку количество значений порога равно объему испытываемой выборки  $n$ . Поэтому предлагаемый в источниках алгоритм [1] не является оптимальным в статистическом смысле.

Так как совместное распределение рангов является равномерным при отсутствии сигнала, а при его наличии нарушается этот закон, то задача обнаружения сводится к поиску статистически оптимального (по максимальной мощности) критерия равномерного распределения.

В данном случае, при использовании критерия согласия хи-квадрат Пирсона [2], стандарт рекомендует проделать «анализ через синтез», что приводит к вычислениям большой сложности.

В настоящее время имеется достаточно много публикаций на тему сравнения критериев проверки статистических гипотез. Например, в [3] проведен анализ критериев для случая равномерного закона распределения. Существуют специальные критерии проверки, использующие различные разности значений вариационного ряда. Представители этой группы являются наименее мощными в отличие от других критериев – непараметрических. К непараметрическим критериям также относятся и критерий хи-квадрат Пирсона.

Из анализа характеристик непараметрических критериев [3], видно, что наиболее мощным является критерий Жанга. Но этот критерий обладает одним большим недостатком – распределение статистики, которая является мерой различия равномерного закона распределения и эмпирического, сильно зависит от числа выборки  $n$ .

Поэтому предлагается использовать следующий в списке ранжирования по мощности – критерий Ватсона [3] – [10], в котором зависимость распределения статистики от объема выборки выражена слабо. Критерий Ватсона является развитием более известного критерия согласия – критерия Крамера-Мизеса-Смирнова. Критерий Ватсона был предложен для проверки простых гипотез, который в данном случае несколько выигрывает по мощности у критерия Крамера-Мизеса-Смирнова.

Статистика критерия Ватсона при проверке равномерности принимает вид

$$U_n^2 = \sum_{i=1}^n \left( U_i - \frac{i - \frac{1}{2}}{n} \right)^2 - n \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12n}, \quad (7)$$

где  $U_i$  – элементы вариационного ряда  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ , построенного по исходной выборке  $X$ .

Чтобы свести задачу к проверке простой гипотезы  $H_0$  о соответствии эмпирического распределения с равномерным необходимо нормировать ранги. Тогда проверка равномерности будет проходить на интервале  $[0, 1]$ . При справедливости гипотезы  $H_0$  статистика (7) в пределе подчиняется закону с функцией распределения вида

$$Watson(s) = 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} e^{-2m^2\pi^2s}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлен график плотности вероятности статистики Ватсона (7).

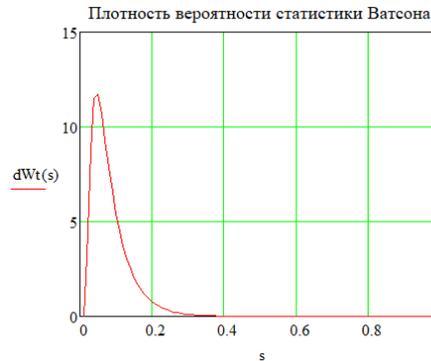


Рис. 1. Плотность вероятности статистики Ватсона (7)

Авторы, которые занимались изучением характеристик данной статистики, предлагают использовать ее модификацию

$$U_n^{2*} = (U_n^2 - 0.1/n + 0.1/n^2)(1 + 0.8/n), \quad (9)$$

распределение которой при  $n \geq 20$  практически не отличается от предельного.

Критерий Ватсона относится к правосторонним критериям, что подтверждает рис. 1. Поэтому проверяемая гипотеза  $H_0$  отклоняется при больших значениях статистики  $U_n^2$  в сторону альтернативы  $H_1$ , что свидетельствует о наличии сигнала.

**3. Результаты численного моделирования.** Принимать решение о результатах проверки гипотезы можно сравнивая значение статистики  $U_n^2$ , вычисленное по анализируемой выборке в соответствии с (7) или (9), с ее критическим значением при заданной вероятности ложной тревоги  $P_{лт}$ . Процентные точки распределения статистики критерия Ватсона для заданных вероятностей ложных тревог приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Процентные точки распределения статистики критерия Ватсона**

Функция распределения	Верхние процентные точки		
	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$
<i>Watson (S)</i>	0,385066	0,618367	0,851668

В случае, когда происходит вычисление рангов входного процесса без опорной выборки, распределение рангов имеет равномерное распределение (рис. 2, сверху). Распределение рангов с опорной выборкой при условии наличия входного сигнала отличается от равномерного (рис. 2, снизу). Это отличие проявляется сильнее, чем выше входное отношение сигнал/помеха.

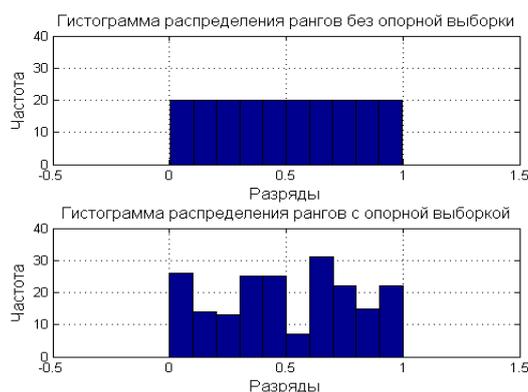


Рис. 2. Гистограммы распределения рангов, сверху - без опорной выборки при  $n = 200$ , снизу – с опорной выборкой при  $n = 200$  и  $c/\text{ш} = -20 \text{ dB}$

Гистограммы построены в системе MATLAB [20].

На рис. 3 приведено распределение рангов при отношении сигнал/помеха на входе  $0 \text{ dB}$ .

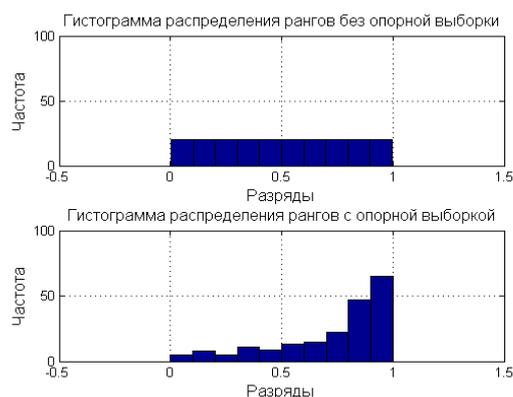


Рис. 3. Гистограммы распределения рангов, сверху - без опорной выборки при  $n = 200$ , снизу – с опорной выборкой при  $n = 200$  и  $c/\text{ш} = 0 \text{ dB}$

Для определения качества рангового обнаружителя с выбранным критерием согласия необходимо вычислить полученную вероятность правильного обнаружения ( $1 - \beta$ , где  $\beta$  – вероятность ошибки второго рода или пропуск сигнала). Для вы-

числения вероятности правильного обнаружения количество экспериментов, осуществляемых при статистическом моделировании, принималось равным  $10^6$ . Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Рассчитанная вероятность правильного обнаружения рангового обнаружителя с критерием Ватсона**

Сигнал/помеха (с/ш), <i>dB</i>	$P_{\text{лт}} = 10^{-3}$	$P_{\text{лт}} = 10^{-5}$	$P_{\text{лт}} = 10^{-7}$
-20	0	0	0
-6	0.447617	0.154952	0.046739
-3	0.966941	0.813828	0.564963
0	0.999999	0.999973	0.999545

Как видно из результатов, ранговый обнаружитель с выбранным критерием согласия равномерного распределения (критерием Ватсона) в условиях априорной неопределенности показывает хорошие характеристики при достаточном входном отношении сигнал/помеха. Обычно ранговая обработка ведется после детектирования, где отношение сигнал/помеха достаточно высокого. Поэтому качество детектирования, следовательно, и характеристики рангового обнаружителя будут улучшаться по мере возрастания информации о параметрах полезного сигнала.

**Заключение.** Использование предлагаемого подхода к решению задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности обеспечивает следующие характеристики системы:

- 1) применение ранговой обработки сигналов обеспечивает нечувствительность характеристик системы обнаружения к изменяющимся параметрам сигналов и помех;
- 2) выбранный непараметрический критерий согласия Ватсона обеспечивает достаточно хорошие показатели системы в условиях существенной априорной неопределенности.

Применение данного подхода к решению задачи обнаружения в реальных условиях возможно только после фильтрации и усиления входного сигнала для обеспечения достаточного отношения сигнал/помеха (в условиях проведенного эксперимента не менее  $-6$  *dB*).

Предлагаемый подход может найти место во многих областях науки и техники, где имеет место быть априорная неопределенность. В частности, при обнаружении широкополосных (шумоподобных) сигналов. Например, сигналы, модулированные по принципу частотного уплотнения (OFDM).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапий В.Ю., Калюжный А.Я., Красный Л.Г. Устройства ранговой обработки информации. – К.: Техника, 1986. – 120 с.
2. Р 50.1.033–2001. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. I. Критерии типа хи-квадрат. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 87 с.
3. Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. – Новосибирск, 2015. – 182 с.
4. Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю., Лемешко С.Б. О критериях проверки равномерности закона распределения вероятностей // Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 2.
5. Лемешко Б.Ю., Горбунова А.А. О применении и мощности непараметрических критериев согласия Купера, Ватсона и Жанга // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 3-9.
6. Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A. Application of nonparametric Kuiper and Watson tests of goodness-of-fit for composite hypotheses // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56, No. 9. – P. 965-973.

7. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A.* Application and Power of the Nonparametric Kuiper, Watson, and Zhang Tests of Goodness-of-Fit // *Measurement Techniques*. – 2013. – Vol. 56, No. 5. – P. 465-475.
8. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A., Lemeshko S.B., Rogozhnikov A.P.* Solving problems of using some nonparametric goodness-of-fit tests // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2014. – Vol. 50, No. 1. – P. 21-35.
9. *Watson G.S.* Goodness-of-fit tests on a circle. I // *Bio-metrika*. – 1961. – Vol. 48, No. 1-2. – P. 109-114.
10. *Watson G.S.* Goodness-of-fit tests on a circle. II // *Bio-metrika*. – 1962. – Vol. 49, No. 1-2. – P. 57-63.
11. *Федосов В.П.* Прикладные математические методы в статистической радиотехнике: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 74 с.
12. *Рыжов В.П., Федосов В.П.* Оптимальные методы обработки сигналов на фоне помех: Текст лекций. – Таганрог: ТРТИ, 1990. – 54 с.
13. *Федосов В.П.* Радиотехнические цепи и сигналы: для самостоятельного изучения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 208 с.
14. *Рыжов В.П., Федосов В.П.* Анализ радиотехнических устройств при воздействии случайных процессов. – Таганрог: ТРТИ, 1986.
15. *Рыжов В.П., Федосов В.П.* Статистические методы обработки сигналов. – Таганрог: ТРТИ, 1986.
16. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Советское радио, 1977. – 432 с.
17. *Богданович В.А., Вострецов А.Г.* Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. – М.: Физматлит, 2003. – 320 с.
18. *Гаек Я., Шидак З.* Теория ранговых критериев: пер. с англ. – М.: Наука, 1971.
19. *Рабинер Л., Гоулд Р.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978.
20. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Изд-во «Питер», 2002. – 608 с.

#### REFERENCES

1. *Lapiy V.Yu., Kalyuzhnyy A.Ya., Krasnyy L.G.* Ustroystva rangovoy obrabotki informatsii [Devices of rank information processing]. К.: Tekhnika, 1986, 120 p.
2. R 50.1.033–2001. Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytного raspredeleniya s teoreticheskim. Ch. I. Kriterii tipa khi-kvadrat [P 50.1.033-2001. Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for checking the agreement of the experimental distribution with the theoretical one. Part I. Criteria of the chi-square type]. Moscow: Izd-vo standartov, 2002, 87 p.
3. *Lemeshko B.Yu., Blinov P.Yu.* Kriterii proverki otkloneniya raspredeleniya ot ravnomernogo zakona [Criteria for checking the deviation of the distribution from the uniform law]. ovosibirsk, 2015, 182 p.
4. *Lemeshko B.yu., Blinov P.Yu., Lemeshko S.B.* O kriteriyakh proverki ravnomernosti zakona raspredeleniya veroyatnostey [On the criteria for checking the uniformity of the probability distribution law], *Avtometriya* [Autometry], 2016, Vol. 52, No. 2.
5. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A.* O primenenii i moshchnosti neparametricheskikh kriteriev soglasiya Kopera, Vatsona i Zhanga [On the application and power of nonparametric consent criteria of Cooper, Watson and Zhang], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Technique], 2013, No. 5, pp. 3-9.
6. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A.* Application of nonparametric Kuiper and Watson tests of goodness-of-fit for composite hypotheses, *Measurement Techniques*, 2013, Vol. 56, No. 9, pp. 965-973.
7. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A.* Application and Power of the Nonparametric Kuiper, Watson, and Zhang Tests of Goodness-of-Fit, *Measurement Techniques*, 2013, Vol. 56, No. 5, pp. 465-475.
8. *Lemeshko B.Yu., Gorbunova A.A., Lemeshko S.B., Rogozhnikov A.P.* Solving problems of using some nonparametric goodness-of-fit tests, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 21-35.
9. *Watson G.S.* Goodness-of-fit tests on a circle. I, *Bio-metrika*, 1961, Vol. 48, No. 1-2, pp. 109-114.

10. *Watson G.S.* Goodness-of-fit tests on a circle. II, *Bio-metrika*, 1962, Vol. 49, No. 1-2, pp. 57-63.
11. *Fedosov V.P.* *Prikladnye matematicheskie metody v statisticheskoy radiotekhnike: ucheb. posobie* [Applied mathematical methods in statistical radio engineering: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 74 p.
12. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Optimal'nye metody obrabotki signalov na fone pomekh: Tekst lektsiy* [Optimal methods of signal processing against the background of interference: The text of lectures]. Taganrog: TRTI, 1990, 54 p.
13. *Fedosov V.P.* *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: dlya samostoyatel'nogo izucheniya: ucheb. posobie* [Radio engineering circuits and signals: for self-study: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, 208 p.
14. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Analiz radiotekhnicheskikh ustroystv pri vozdeystvii sluchaynykh protsessov* [Analysis of radio engineering devices under the influence of random processes]. Taganrog: TRTI, 1986.
15. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Statisticheskie metody obrabotki signalov* [Statistical methods of signal processing]. Taganrog: TRTI, 1986.
16. *Repin V.G., Tartakovskiy G.P.* *Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system* [Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977, 432 p.
17. *Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G.* *Teoriya ustoychivogo obnaruzheniya, razlicheniya i otsenivaniya signalov* [The theory of stable detection, discrimination and evaluation of signals]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 320 p.
18. *Gaek Ya., Shidak Z.* *Teoriya rangovykh kriteriev* [The theory of rank criteria]: translated from English. Moscow: Nauka, 1971.
19. *Rabiner L., Gould R.* *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* [Theory and application of digital signal processing]. Moscow: Mir, 1978.
20. *Sergienko A.B.* *TSifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint Petersburg: Izd-vo «Piter», 2002, 608 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Марьев.

**Приходченко Алексей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: zzalxeizz@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Prikhodchenko Alexey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: zzalxeizz@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the Department of Fundamentals of Radio Engineering; postgraduate.

УДК 62-5:519.6

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-172-185

**Хуанг Чун-Пинь**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*Представлена технология компьютерного моделирования процесса вакуумной инфузии в производстве крупногабаритных полимеркомпозитных конструкций, привлекающего все большее внимание при производстве летательных аппаратов, благодаря простоте реализации и относительно низкой стоимости подготовки производства. Трудность промышленной реализации процесса и обеспечения требуемого качества обусловлена его высокой чувствительностью к режимам - температуре, вакуумному давлению и схеме расположения портов вакуума и инъекции связующего. Цель разработанной методики компьютерного моделирования процесса с возможностью его последующей оптимизации состоит в исключении используемого в настоящее время длительного и весьма дорогостоящего метода проб и ошибок при отработке технологии. Предлагаемая математическая модель*

*процесса, связывающая уравнение фазового поля, реконструирующего границу раздела связующего и вакуумированной области преформы, уравнения Ричардса движения вязкой жидкости в ненасыщенной пористой среде, термокинетики связующего и теплопроводности реализована в среде конечноэлементного пакета. Компьютерная реализация модели обеспечивают точную реконструкцию динамики фронта распространения связующего в пористой преформе, возможность возникновения и локализацию непропитанных зон формуемой конструкции, тем самым, позволяя исключить образование неисправимого брака. Полученные результаты демонстрируют способность разработанной техники обеспечить стабильность качества производимых композитных конструкций с повышенными требованиями к сплошности структуры и конструктивной прочности.*

*Полимерные композиты; Технология композитов; Вакуумная инфузия; Моделирование и оптимизация процессов.*

**Jyun-Ping Huang**

### **MODELING OF THE VACUUM INFUSION PROCESSES IN THE MANUFACTURING OF THE LARGE POLYMERIC COMPOSITE STRUCTURES**

*The article presents the technology of computer simulation of the vacuum infusion process in the production of large-sized polymeric composite structures, which is attracting more and more attention in the aircraft industry, due to the ease of implementation and the relatively low cost of production preparation. The difficulty of industrial implementation of the process and ensuring the required quality is due to its high sensitivity to modes - temperature, vacuum pressure and the layout of the vacuum ports and resin injection. The purpose of the developed methodology for computer modeling of the process with the possibility of its subsequent optimization is to exclude the currently used lengthy and very expensive trial and error method when working out the technology. The proposed mathematical model of the process linking the equation of the phase field, which reconstructs the interface between the resin and the void region of the preform, the Richards equation for the propagating viscous fluid in an unsaturated porous medium, the thermal kinetics of the resin and thermal conductivity, is implemented in the environment of a finite element package. Computer implementation of the model provides an accurate reconstruction of the dynamics of the front of the propagating resin in a porous preform, the possibility of the emergence and localization of non-impregnated zones of the molded structure, thereby eliminating the formation of irreparable defects. The results obtained demonstrate the ability of the developed technique to ensure the stability of the quality of the produced composite structures with increased requirements for the continuity of its microstructure and its structural strength.*

*Polymeric composites; Composite technology; Vacuum infusion; Process modeling and optimization.*

**1. Введение.** Технологии производства полимерных композитов на основе вакуумной инфузии привлекают все большее внимание инженеров и ученых благодаря простоте ее реализации, невысокой стоимости и трудоемкости подготовки производства. Однако промышленное использование этих технологий требует большого количества предварительных пробных испытаний для обеспечения стабильного качества изготавливаемых конструкций из-за высокой чувствительности процесса к его графику температуры / давления и схемам [1]. Эта особенность делает актуальной разработку систем компьютерного моделирования, позволяющих корректно описывать динамику инфузионного процесса. Сущность процесса и некоторые его разновидности подробно описаны в обзорных и исследовательских работах [2–4]. Процесс вакуумной инфузии в различных его модификациях успешно применяется в авиа-, судо-, автомобилестроении, ветроэнергетике, в производстве космических аппаратов. Области рационального применения большинства разновидностей процесса (VARTM, VAP, RFI, SRCIMP, DP-RTM и др.) подробно классифицированы в работах [5, 6]. Эти разновидности ориентированы на произ-

водство различных видов композитных конструкций, а также на использование специальных средств для ускорения и улучшения насыщения преформы смолой, таких как высокопроницаемые среды (НРМ) и полупроницаемые мембраны [3, 7].

Общий принцип процессов вакуумной инфузии представлен на рис. 1. На поверхность формы укладывают несколько сухих слоев волокна или углеродной ткани и накрывают тонким гибким вакуумным мешком. Затем герметизируют весь технологический пакет, к нему подключают вентиль подачи смолы и вакуумный порт. После включения вакуумного насоса атмосферное давление сжимает пористую заготовку, и жидкая смола начинает двигаться и заполнять сухую преформу из-за разницы давлений внутри нее. К сожалению, во многих случаях эта технология не обеспечивает достаточной повторяемости и качества изготавливаемых деталей. Вариации процесса VARTM и причины ухудшения качества рассматривались во многих теоретических и экспериментальных исследованиях [8].

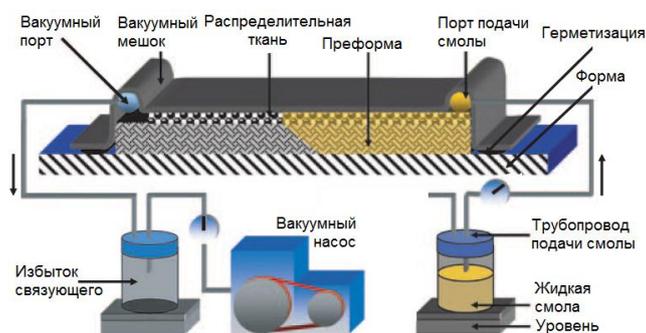


Рис. 1. Схема процессов вакуумной инфузии

Основными технологическими проблемами, препятствующими промышленному внедрению этого процесса, являются медленная или плохо контролируемая пропитка смолой, часто сопровождающаяся образованием сухих пятен, следствием чего являются плохая повторяемость и низкая надежность готовых композитных конструкций [9, 10].

В перечисленных выше работах сообщается, что картина распределения смолы в преформе очень чувствительна к расположению и пропускной способности отверстий для смолы и вакуума, а также к температурному режиму, который определяет изменение вязкости смолы во времени. Поскольку метод проб и ошибок, используемый в производстве, требует значительных затрат времени, средств, и не всегда позволяет получить всю информацию, необходимую для разработки оптимального технологического процесса, усилия ученых и инженеров направлены на разработку адекватного теоретического описания процесса вакуумной инфузии и инструментов для компьютерного моделирования, способных прогнозировать развитие процесса во времени с учетом всех возникающих явлений, включая сжатие преформы атмосферным давлением и уменьшение в результате этого сжатия ее пористости и проницаемости, изменение распределения давления в частично заполненной преформе, а также теплофизических свойств и вязкости смолы, которая зависит от времени, температуры и степени отверждения.

Первое из этих программных средств LIMS, а также разработанные позже системы PAM-RTM, RTM-WORKS, 3DINFIL, RTMSim, Moldex3D RTM, основаны на законе Дарси для зависимости приведенной скорости смолы от градиента рабочего давления и так называемом методе Конечных элементов / Контрольных объемов (FE/CV), основы которого были разработаны в 90-х годах XX века и пред-

ставлены в работе [11]. Несмотря на некоторые улучшения метода FE/CV, такие как использование неявного интегрирования по времени, переопределение геометрии области потока и переразбиение сетки на каждом временном шаге, метод не обеспечивает удовлетворительной точности формы и динамики распространения фронта смолы из-за грубого разбиения сетки контрольных объемов, очень сложного алгоритма расчета граничных условий на фронте потока, высокой чувствительности к размеру временного шага и неудовлетворительной точности описания течения жидкости в ненасыщенной пористой среде законом Дарси.

Значительное улучшение возможностей прямой задачи может быть достигнуто путем прямого моделирования состояния фронта смолы с помощью уравнения фазового поля [12], которое не требует искусственного построения контролируемых объемов, присущих методу FE / CV, а также учетом особенностей распространения жидкой смолы в не полностью насыщенной преформе, описываемой уравнением Ричардса [13], как представлено в [14]. Впервые такой подход был реализован в [15] при решении задачи о границе раздела двух разных жидкостей и в [16] при моделировании процесса вакуумной инфузии. В настоящей работе использован аналогичный подход, дополненный учетом тепловых, кинетических и реологических эффектов на примере процесса вакуумной инфузии преформы со сложной 3D-геометрией.

Текст статьи содержит математическую формулировку связанной задачи моделирования, вывод полуэмпирических соотношений для параметров процесса, обеспечивающих взаимосвязь уравнений задачи, некоторые примеры результатов моделирования процесса вакуумной инфузии трехмерной композитной конструкции с различным расположением, количеством и пропускной способностью портов для подачи смолы и вакуума.

**2. Определяющие уравнения процесса вакуумной инфузии.** Уравнение фазового поля Кана-Хиллиарда [12], которое было принято как ведущее, описывает движение границы между двумя различными фазами (например, А и В).

$$\partial\phi/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla\phi = \nabla \cdot \gamma \nabla G, \quad (1)$$

где фазовая подвижность  $\gamma$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) определяет масштаб времени диффузии,  $G$  (Па) – химический потенциал. Переменная фазового поля  $\phi$  описывает концентрации компонентов А и В, которые равны  $(1+\phi)/2$  и  $(1-\phi)/2$ , соответственно. Решением уравнения (1) являются значения  $\phi$  равные +1 или -1, за исключением очень тонкой области на границе раздела двух фаз. Значение переменной  $\phi$  позволяет определить локальное заполнение преформы смолой и относительный объем пустот как  $V_r = (\phi+1)/2$ ;  $V_r \in [0;1]$  и  $V_v = 1 - V_r$ , соответственно.

Граничные условия уравнения фазового поля (1):

Порт подачи смолы:

$$\phi = 1. \quad (2)$$

Стенки заполненного смолой объема:

$$\mathbf{n} \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к стенке преформы

Вакуумный порт:

$$\phi = -1. \quad (4)$$

Начальным условием для переменной  $\phi$  во всем объеме преформы  $\Omega$  является  $\phi_\Omega(t=0) = -1$ . Для конечно-элементной (КЭ) реализации процесса вакуумной инфузии крупногабаритной композитной детали были приняты следующие значения параметров задачи:

Ширина интерфейса  $\varepsilon$  для переменной  $\phi$  равна максимальному размеру  $h_{max}$  КЭ разбиения:

$$\varepsilon = h_{max} / 2 = 0.0025 \text{ м} \quad (5)$$

Фазовая подвижность  $\gamma$  :

$$\gamma = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг} \quad (6)$$

Оценка максимальной скорости распространения смолы  $u_{max}$ :

$$u_{max} = 1 \text{ мм/с} \quad (7)$$

Определение приведенной скорости смолы  $\mathbf{u}$  в уравнении (1) производилось путем предварительного расчета поля давлений  $p(x, y, z, t)$  в преформе из уравнения Ричардса [13], преобразованного к форме

$$V_\phi [2\zeta/\pi(1+(\zeta p)^2)] \cdot \partial p / \partial t - \nabla \cdot ((K/\mu)\nabla p) = 0, \quad (8)$$

где  $V_\phi$  – локальная пористость преформы,  $K$  – проницаемость,  $\mu$  – вязкость смолы, значение  $\zeta = 1/p_{ref}$ , при котором эталонное давление  $p_{ref}$  принимается равным текущему атмосферному давлению  $p_{atm}$ .

Граничные условия уравнения (8) следующие:

Давление смолы в порте (портах) подачи смолы равно атмосферному  $p_{atm}$  :

$$p_{inl} = p_{atm} = 100 \text{ кПа} \quad (9)$$

Давление в вакуумном порте (портах) принято осциллирующим около величины  $p_{vac} = 20 \text{ кПа}$  с периодом 3 мин, что было впервые предложено в работе [16] для определения в ходе моделирования момента времени отделения пустых областей от вакуумного порта:

$$p_{out} = p_{vac} \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{2\pi}{180}\right)\right) \text{ кПа} \quad (10)$$

На остальных поверхностях:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0. \quad (11)$$

Начальным условием для увлекающего смолу давления во всем объеме заготовки  $\Omega$  является  $p(x, y, z, 0) = p_{vac}$ .

Эволюция процесса полимеризации смолы описывалась автокаталитическим уравнением, которое учитывает ее движение в процессе непрерывного изменения степени полимеризации  $\alpha$  [17]:

$$\begin{cases} \partial \alpha / \partial t = A_2 \cdot (w \cdot \Xi_1 + \Xi_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n + (K/\mu) \nabla p \cdot \nabla \alpha, \\ \Xi_i = \exp(-E_i/(RT)); \quad i = 1, 2. \end{cases} \quad (12)$$

Все коэффициенты уравнения (12), определенные для смолы Toray ER450 экспериментально методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по методике [18], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (2.14) для эпоксидной смолы Toray ER450

Весовые коэффициенты		Энергии активации, Дж/кмоль		Степени		Газовая константа, Дж/(К*кмоль)
$A_2, \text{с}^{-1}$	$w$	$E_1,$	$E_2$	$m$	$n$	$R$
0.095	0.086	$2.3858 \cdot 10^7$	$6.412 \cdot 10^6$	2.06	1.85	8310

Уравнение (12) определено в подобласти  $\Omega$ , где  $V_r \geq 0.01$ . Граничное условие для степени полимеризации  $\alpha$  на входе (входах) смолы зависело от используемого температурного режима, и на других границах:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \alpha = 0. \quad (13)$$

Процесс теплообмена в пропитываемой смолой преформе моделировался с использованием уравнения теплопроводности

$$\rho_{pr} C_{pr} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{pr} \nabla T) = Q_{exo}, \quad (14)$$

где  $\rho_{pr}$  – массовая плотность преформы,  $C_{pr}$  – удельная теплоемкость преформы и  $k_{pr}$  – ее коэффициент температуропроводности на всех этапах заполнения смолой. Интенсивность  $Q_{exo}$  объемного источника тепла, вызванного экзотермией полимеризации, зависела от скорости отверждения смолы и от заполненности  $V_r$  пористой преформы смолой

$$Q_{exo} = Q_{tot} \rho_r (1 - V_f) \cdot V_r \cdot \partial \alpha / \partial t, \quad (15)$$

где  $Q_{tot} = 0.106 \cdot 10^6$  Дж/кг – количество тепла, выделяющееся при полимеризации единицы объема смолы,  $\rho_r = 1200$  кг/м<sup>3</sup> – массовая плотность смолы и  $V_f = 1 - V_\phi$  – относительная объемная доля армирующих волокон, которая изменяется в процессе продвижения смолы.

Для получения формулировки прямой связанной задачи в замкнутой форме были определены зависимости параметров системы, входящих в определяющие уравнения (1), (8), (12), (14). Соответствующие процедуры представлены в следующем разделе.

**3. Связь уравнений модели.** Атмосферное давление, приложенное к поверхности гибкого вакуумного мешка, уплотняет частично заполненную преформу, изменяя ее пористость и проницаемость. Это давление сжатия зависит от внутреннего давления при заполнении преформы смолой [4, 19]

$$p_{comp}(\mathbf{r}) = p_{atm} - p(\mathbf{r}). \quad (16)$$

Первое эмпирическое описание процесса компактирования преформы было дано Gutowski et al. в работе [20]

$$V_f = V_{f_0} \cdot p_{comp}^B, \quad (17)$$

где  $V_{f_0}$  – объемная доля волокна при 1.0 Па, а  $B$  – показатель степени жесткости, который зависит от архитектуры волокна. В ряде работ экспериментально доказано, что сжимаемость сухой и влажной преформ существенно различается, но может быть описана соотношением типа (17) [4] с разными параметрами  $V_{f_0}, B$ .

Для получения требуемых соотношений, характеризующих сжимаемость используемой преформы, были заимствованы экспериментальные данные из [21], полученные при исследовании преформы из разнонаправленных углеродных тканей с аналогичными свойствами. Результирующие эмпирические зависимости для сжимаемости преформ в сухом (18.1) и полностью пропитанном (18.2) состоянии представлены ниже вместе с моделью сжимаемости частично смоченной преформы (18.3), полученной с использованием правила смесей.

$$V_f^{dry}(p_{comp}) = a \cdot p_{comp}^b + c; \quad [a; b; c] = [0.03; 0.131; 0.403], \quad (18.1)$$

$$V_f^{wet}(p_{comp}) = A \cdot p_{comp}^B + C; \quad [A; B; C] = [0.098; 0.093; 0.303], \quad (18.2)$$

$$V_f^{dry-wet}(p_{comp}) = (1 - V_r) \cdot V_f^{dry}(p_{comp}) + V_r \cdot V_f^{wet}(p_{comp}). \quad (18.3)$$

Представленный здесь и ниже подход, который позволяет использовать правило смесей для сред, распространяющихся в преформе – воздуха и жидкой смолы, – основан на следующем предположении. Прежде всего, он не учитывает процессы взаимодействия между двумя названными средами, в частности, явление диффузии, что подразумевает возможность усреднения с учетом относительного содержания каждой среды в занимаемом объеме.

При инъекции жидкой смолы в пористую преформу геометрия фронта и характер ее распространения определяются тензором проницаемости ткани [3–6]. Однако удовлетворительная оценка проницаемости многослойной ткани представляет собой сложную проблему, поскольку разные экспериментальные методы в разных лабораториях могут отличаться на целый порядок для одного и того же материала. Реальный прототип моделируемой преформы содержал 12 слоев углеродной ткани TORAY® CO6347B саржевой плетеной структуры 2/2, укладываемых по схеме [60; -30; 30; -60; 0; 90]s, образуя симметричный сбалансированный ламинат толщиной ~ 3,2 мм (до впрыска смолы), используемый при изготовлении деталей, не несущих значительных нагрузок. Трансверсальная изотропия его проницаемости в плоскости была подтверждена в экспериментах с радиальным потоком, когда смола вводилась в форму через центральное впускное отверстие, и распространялась, образуя круговой фронт. В настоящем исследовании предполагалось, что проницаемость ткани изотропна, что было обосновано на результатах эксперимента и анализа размерностей процесса [3]. Для зависимости проницаемости преформы от пористости или объемной доли волокна использовалось уравнение Козени-Кармана

$$K = \tilde{k} \cdot (1 - V_f)^3 / V_f^2, \quad (19)$$

применимое для расчета как продольной, так и поперечной проницаемости, что было установлено многими экспериментальными исследованиями [3, 4, 10, 19] стекло- и углепластиковых преформ. При этом, как показало сравнение справочных данных, соотношение (19) с коэффициентом  $\tilde{k} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  могло быть применимо как для воздуха, так и для жидкой смолы различной вязкости.

В численных экспериментах использовался следующий закон температуры окружающей среды, действующей на преформу конвективным тепловым потоком

$$T(t) = T^{in} + (T^{hold} - T^{in}) \cdot \tanh^2(t/\tau), \quad (20)$$

где  $T^{in}$  – температура смолы, нагретой непосредственно перед вводом в преформу,  $T^{hold}$  – температура длительной изотермической выдержки,  $\tau$  – постоянная времени, определяющая скорость установления температуры, принятая равной 5 мин. Для описания поведения вязкости  $\mu$  смолы от времени  $t$ , температуры  $T(t)$  и степени полимеризации  $\alpha$  использовалась модель Кастро-Макоско, модернизированная с целью исключения разрыва в момент начала желатинизации смолы

$$\mu(T, \alpha, t) = \mu_0(T^{in}) \cdot \exp(\nu_1 \cdot (T(t) - T^{in}) + \nu_2 \cdot \alpha(T, t)), \quad (21)$$

где  $\mu_0(T^{in})$  – вязкость смолы в момент ее ввода в преформу,  $T(t)$  – текущая температура и  $\alpha(T, t)$  – степень полимеризации, соответственно, и  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициенты, которые определялись для смолы Toray ER450 путем аппроксимации данных произ-

водителя. Значение степени полимеризации рассчитывалось из уравнения (12) с учетом ее начального значения. Соответствующие графические зависимости для смолы, нагреваемой от 20 °С до различных температур  $T^{hold}$  приведены на рис. 2.

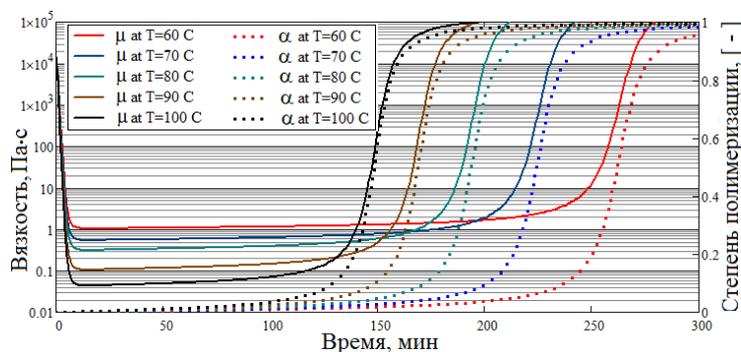


Рис. 2. Изменение степени полимеризации  $\alpha(T, t)$  (12) и вязкости  $\mu(T, \alpha, t)$  (21) смолы Toray ER450 во времени при нагреве по закону (20)

Модельное описание теплофизических свойств заполняемой преформы – массовой плотности  $\rho_{pr}$ , теплоемкости  $c_{pr}$ , температуропроводности  $k_{pr}$ , основывалось на правиле смесей, меняющихся в процессе объемных и массовых фракций армирующих волокон, смолы и воздуха, а также данных производителя компонентов композита [22] и табличных зависимостей для воздуха.

**4. Численные эксперименты. Результаты и дискуссия.** Рассмотренная постановка задачи, реализованная в пакете КЭ моделирования Comsol Multiphysics 5.5, использовалась для поиска оптимального расположения портов поддержания вакуума и подачи смолы, а также для рационального выбора температурного режима, обеспечивающих исключение образования сухих пятен и минимизацию времени заполнения преформы. Ниже представлены некоторые результаты моделирования процесса вакуумной инфузии тонкостенной 3D оболочечной конструкции из углепластика толщиной 3 мм с двумя вырезами - «окнами». CAD-модель конструкции была тщательно переработана, чтобы исключить нарушение непрерывности на стыках участков поверхности и получить удовлетворительное сеточное разбиение без образования сверхмалых и инвертированных элементов вблизи стыков (рис. 3).

Как показано на рис. 4, лента НРМ постоянной ширины была размещена на внешней поверхности преформы по ее периметру для ускорения процесса. Цифры на стрелках указывают расположение портов в рассмотренных схемах процессах, желтые стрелки – порты подачи смолы, а синие стрелки - вакуумные порты. Площадь поперечного сечения портов для всех исследованных случаев принималась неизменной: площадь верхнего левого – 0.63 см<sup>2</sup>, верхнего правого – 0.64 см<sup>2</sup> и нижнего – 0.25 см<sup>2</sup>. В первом случае смола подавалась через нижний порт, а вакуум создавался двумя верхними, тогда как во втором и третьем случаях смола подавалась через два верхних порта (рис. 4). Лента НРМ была смоделирована как функция проницаемости, зависящая от расстояния до стенок, действующая на внешний и внутренний края преформы; проницаемость под лентой НРМ была увеличена в 5 раз. Решение нестационарной задачи было реализовано с шагом по времени 30 секунд от начального состояния до 5 часов. Шаг интегрирования по времени был выбран с учетом периода колебаний давления, создаваемого вакуумным насосом (10), максимальной скорости фронта смолы и размеров элементов КЭ сетки.

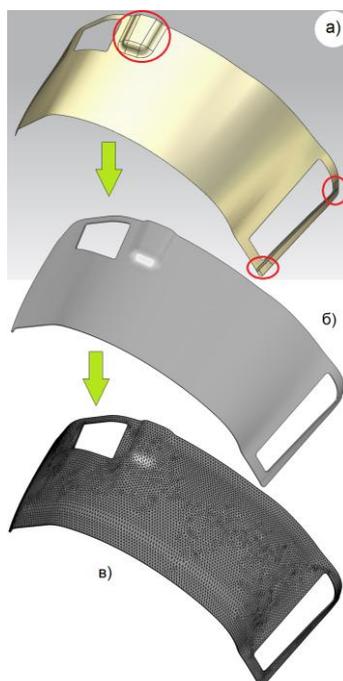


Рис. 3. Переход от CAD к КЭ модели: а – исходная CAD модель; б – CAD модель после удаления стыков; в) КЭ разбиение геометрии, импортированной из CAD модели



Рис. 4. Расположение портов для трех рассмотренных вариантов

На рис. 5–8 показаны снимки распространяющегося фронта смолы, изображенного как геометрические места точек с  $V_r=0,1$  (зеленая линия); 0,5 (желтая) и 0,9 (красная), соответственно для исследованных случаев, где цветовая карта поверхности преформы изображает состояние наиболее важных параметров процесса – степень полимеризации и вязкость смолы. На этих рисунках можно видеть, что степень полимеризации смолы внутри преформы очень мала в течение первых 1,5 часов продолжительности процесса вакуумной инфузии, а состояние смолы достаточно далеко от желатинизации.

Наблюдение за продвижением смолы в случае 1, когда порт подачи смолы находится внизу, а два вакуумных отверстия расположены сверху, демонстрирует ситуацию, аналогичную той, что иногда возникает на автомагистрали, когда 4 полосы движения сокращаются до 1 полосы. Перед этим участком образуется пробка. Движение застывающей смолы резко замедляется перед «узкими пере-

мычками» в преформе. Чтобы ускорить распространение смолы и заставить ее проходить «узкие мостики» в состоянии минимальной вязкости на ранней стадии отверждения, расположение портов в случаях 2 и 3 было изменено, как это представлено на рис. 4.

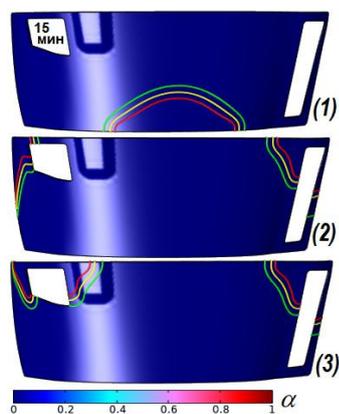


Рис. 5. Расположение фронта смолы после 15 минут процесса для вариантов 1,2,3

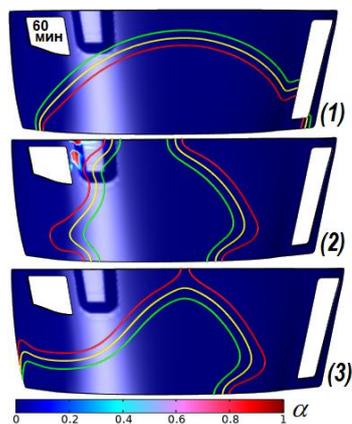


Рис. 6. Расположение фронта смолы после 60 минут процесса для вариантов 1,2,3

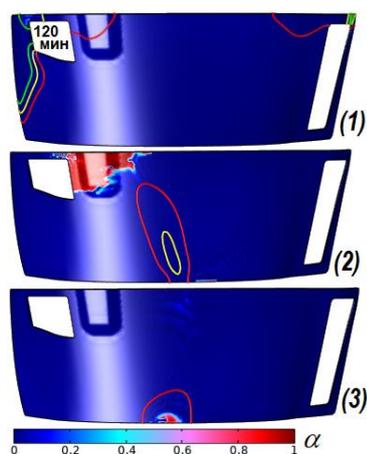


Рис. 7. Расположение фронта смолы после 120 минут процесса для вариантов 1,2,3

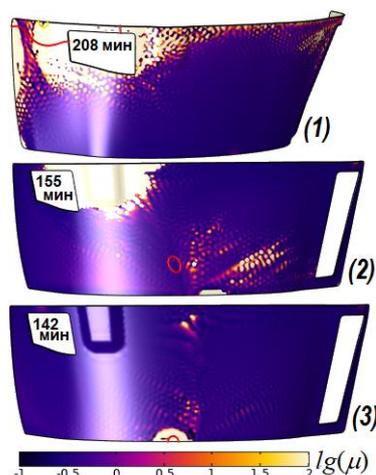


Рис. 8. Расположение фронта смолы и карта распределения вязкости в момент замыкания вакуумного порта для вариантов 1,2,3

Рис. 5–7 изображают распределение степени полимеризации в теле преформы в моменты времени 15, 60, 120 минут, а рис. 8 – распределение вязкости в момент замыкания вакуумного порта, то есть выхода фронта  $V_r=0,9$  за пределы преформы для рассмотренных вариантов. Как видно на рис. 8, завершение процесса заполнения преформы связующим при первой схеме расположения портов происходит значительно позже, чем при второй третьей схемах, и при значительно худших условиях. В момент времени 208 минут левый вакуумный порт оказывается полностью заблокированным отверждающимся связующим, вязкость которого

достигает значения  $100 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и более. Таким образом, заполнение всех пустых пор преформы при условиях численного эксперимента №1 невозможно, и результатом будет неисправимый брак формуемой композитной конструкции.

Выбор схемы №3 продиктован необходимостью уравнивать длительность перемещения смолы от обоих верхних портов до вакуумного порта, расположенного внизу. Как видно на рис. 6, 7 поток смолы, инжектируемой из правого верхнего порта, достигает вакуумного порта значительно раньше потока, движущегося слева. Результатом этого является блокирование вакуумного порта правым потоком смолы, значительное замедление скорости удаления воздуха из преформы и образование во внутренней области преформы не полностью насыщенного связующим замкнутого островка. В связи с тем, что уравнению фазового поля присущ механизм диффузии, продолжение симуляции модели №2 после 155 минут может продемонстрировать исчезновение такого ненасыщенного смолой островка за счет диффузии, но тот факт, что со временем скорость распространения смолы в преформе резко снижается за счет падения градиента давления, полимеризации и резкого роста вязкости смолы, свидетельствует о потенциальной опасности ситуации, представленной на рисунке 8.2. Таким образом, из трех рассмотренных вариантов реализации процесса, схема №3, при которой финальный уровень распределения связующего замыкается на вакуумном порте, а общий уровень вязкости в теле преформы минимален, является безусловно лучшей.

Особенностью разработанного инструмента моделирования является возможность мониторинга некоторых интегральных характеристик процесса в ходе симуляции, что позволяет останавливать расчет при появлении признаков возникновения непропитанных замкнутых областей преформы. В числе таких характеристик средние значения степени полимеризации  $\langle\alpha\rangle$ , ее скорости  $\langle\alpha_t\rangle$ , давления  $\langle p_m\rangle$ , вязкости  $\langle\mu\rangle$ , температуры  $\langle T\rangle$  в объеме преформы, заполненном смолой. Дополнительно производится определение среднего значения заполненности смолой в окрестности вакуумного порта  $V_r^{out}$  и относительного незаполненного объема преформы  $V_v$  (рис. 9, 10).

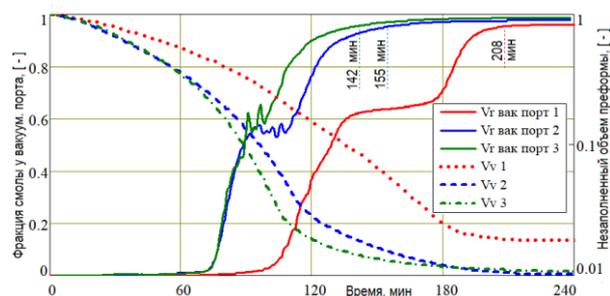


Рис. 9. Временные диаграммы фракции смолы в окрестности вакуумных портов  $V_r^{out}$  и относительного незаполненного объема преформы  $V_v$  для трех исследованных схем процесса

Ступенька на графике  $V_r^{out}$  для первой схемы связана с последовательной блокировкой смолой правого, затем левого вакуумного порта. Менее выраженная ступенька на графике второй схемы обусловлена одновременным прибытием двух потоков смолы к левому и правому границам вакуумного порта. Оба этих нежелательных явления, замедляющих процесс заполнения преформы, отсутству-

ют в третьей схеме процесса. Дополнительным фактором, подтверждающим достижение требуемого качества процесса при его третьей схеме, является небольшой рост давления (то есть рост насыщения смолой) даже после 4 часов с момента старта инфузии.

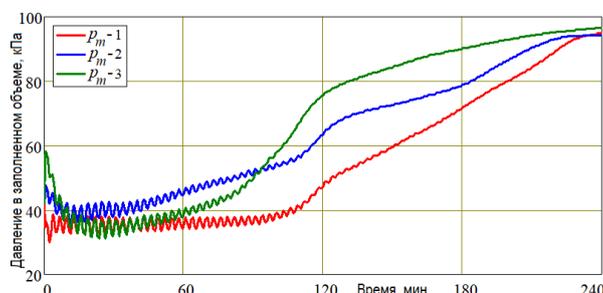


Рис. 10. Временные диаграммы зависимости давления в области преформы, заполняемой смолой, для трех исследованных схем процесса

**Выводы.** Представленные в статье три примера моделирования вакуумной инфузии композитной конструкции при различных схемах расположения портов подачи смолы и вакуума показали, что разработанные средства моделирования позволяют моделировать технологию инфузии при изготовлении композитных деталей сложной формы с высокой точностью и приемлемой вычислительной трудоемкостью. Как показывают скриншоты процесса и графики на рисунках 8, 9, продолжительность процесса до полной его остановки может быть значительно сокращена: от 60 до 70 % в результате оптимального выбора схемы процесса. При этом основной показатель качества - остаточный объем воздуха в преформе может быть снижен в 3 и более раз. Другой важный вывод касается вычислительной трудоемкости и продолжительности моделирования до получения надежного прогноза показателей качества и трудоемкости реального процесса. Сопоставление рисунков 7 и 8 показывает, что худшая из схем №1 уже при симуляции 120 минут протекания инфузионного процесса демонстрирует присутствие в преформе уровня заполненности 0,1 (фронт зеленого цвета) и менее, тогда как при реализации лучшей схемы №3 уровень заполненности смолой 0,9 через 2 часа после начала процесса уже приближается к выходу из преформы. Этот факт демонстрирует не только лучший показатель качества и производительности процесса при реализации схемы №3, но и возможность предсказания результатов процесса на более ранней стадии, что значительно сокращает машинное время работы системы моделирования и обеспечивает возможность ее эффективного использования под управлением оптимизационных алгоритмов. Разработка может быть использована как элемент системы многокритериальной оптимизации, а также автономно при разработке технологии производства ответственных композитных конструкций авиационного применения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смотрова С.А., Наумов С.М., Смотров А.В.* Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Техносфера, 2015. – 215 с.
2. *Osborne T.* An introduction to resin infusion // Reinforced Plastics. – 2014. – Vol. 58, No. 1. – P. 25-29.
3. *Hsiao K.T., Heider D.* Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites // Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). – Woodhead Publishing, 2012. – P. 310-347.

4. *Shah D.U., Clifford M.J.* Compaction, permeability and flow simulation for liquid composite moulding of natural fibre composites // *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites.* – Springer, Cham, 2015. – P. 65-99.
5. *Garschke C. et al.* Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2012. – Vol. 43, No. 6. – P. 935-944.
6. *Summerscales J.* Resin infusion under flexible tooling (RIFT) // *Wiley Encyclopedia of composites.* – 2011. – P. 1-11.
7. *Govignon Q. et al.* Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2008. – Vol. 39, No. 9. – P. 1412-1426.
8. *Matveev M.Y. et al.* A numerical study of variability in the manufacturing process of thick composite parts // *Composite Structures.* – 2019. – Vol. 208. – P. 23-32.
9. *Bertling D., Kaps R., Mulugeta E.* Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process // *CEAS Aeronautical Journal.* – 2016. – Vol. 7, No. 4. – P. 577-585.
10. *Hu W., Centea T., Nutt S.* Effects of material and process parameters on void evolution in uni-directional prepreg during vacuum bag-only cure // *Journal of Composite Materials.* – 2020. – Vol. 54, No. 5. – P. 633-645.
11. *Bruschke M.V., Advani S.G.* A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces // *International Journal for numerical methods in fluids.* – 1994. – Vol. 19, No. 7. – P. 575-603.
12. *Cahn J.W., Hilliard J.E.* Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy // *The Journal of chemical physics.* – 1958. – Vol. 28, No. 2. – P. 258-267.
13. *Richards L.A.* Capillary conduction of liquids through porous mediums // *Physics.* – 1931. – Vol. 1, No. 5. – P. 318-333.
14. *Van Genuchten M.T.* A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil science society of America journal.* – 1980. – Vol. 44, No. 5. – P. 892-898.
15. *Zhou C. et al.* 3D phase-field simulations of interfacial dynamics in Newtonian and viscoelastic fluids // *Journal of Computational Physics.* – 2010. – Vol. 229, No. 2. – P. 498-511.
16. *Shevtsov S. et al.* Experimental and Numerical Study of Vacuum Resin Infusion for Thin-Walled Composite Parts // *Applied Sciences.* – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 1485-1510.
17. *Wei B.J. et al.* Model-assisted control of flow front in resin transfer molding based on real-time estimation of permeability/porosity ratio // *Polymers.* – 2016. – Vol. 8, No. 9. – P. 337.
18. *Wu J.-K. et al.* Identification of thermoset resin cure kinetics using DSC and genetic algorithm // *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electric Engineering (ISEEE), Sapporo, Japan, 26-28 Apr. 2014.* – P. 1-14.
19. *Govignon Q., Bickerton S., Kelly P.A.* Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2010. – Vol. 41, No. 1. – P. 45-57.
20. *Gutowski T.G. et al.* Consolidation experiments for laminate composites // *Journal of Composite Materials.* – 1987. – Vol. 21, No. 7. – P. 650-669.
21. *Grimley B.W. et al.* Preform characterization in VARTM process model development // *Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, San Diego, US, 15-18 Nov. 2004.* – P. 1-14.
22. *Joven R., Minaie B.* Thermal properties of autoclave and out-of-autoclave carbon fiber-epoxy composites with different fiber weave configurations // *Journal of Composite Materials.* – 2018. – Vol. 52, No. 29. – P. 4075-4085.

## REFERENCES

1. *Smotrova S.A., Naumov S.M., Smotrov A.V.* Tekhnologii izgotovleniya silovyykh agregatov aviatsionnykh konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Technologies for manufacturing power units of aircraft structures made of polymer composite materials]. Moscow: Tekhnosfera, 2015, 215 p.
2. *Osborne T.* An introduction to resin infusion, *Reinforced Plastics*, 2014, Vol. 58, No. 1, pp. 25-29.

3. Hsiao K.T., Heider D. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 310-347.
4. Shah D.U., Clifford M.J. Compaction, permeability and flow simulation for liquid composite moulding of natural fibre composites, *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites*. Springer, Cham, 2015, pp. 65-99.
5. Garschke C. et al. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, Vol. 43, No. 6, pp. 935-944.
6. Summerscales J. Resin infusion under flexible tooling (RIFT), *Wiley Encyclopedia of composites*, 2011, pp. 1-11.
7. Govignon Q. et al. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, Vol. 39, No. 9, pp. 1412-1426.
8. Matveev M.Y. et al. A numerical study of variability in the manufacturing process of thick composite parts, *Composite Structures*, 2019, Vol. 208, pp. 23-32.
9. Bertling D., Kaps R., Mulugeta E. Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process, *CEAS Aeronautical Journal*, 2016, Vol. 7, No. 4, pp. 577-585.
10. Hu W., Centea T., Nutt S. Effects of material and process parameters on void evolution in uni-directional prepreg during vacuum bag-only cure, *Journal of Composite Materials*, 2020, Vol. 54, No. 5, pp. 633-645.
11. Brusckhe M.V., Advani S.G. A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces, *International Journal for numerical methods in fluids*, 1994, Vol. 19, No. 7, pp. 575-603.
12. Cahn J.W., Hilliard J.E. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy, *The Journal of chemical physics*, 1958, Vol. 28, No. 2, pp. 258-267.
13. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1931, Vol. 1, No. 5, pp. 318-333.
14. Van Genuchten M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 1980, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
15. Zhou C. et al. 3D phase-field simulations of interfacial dynamics in Newtonian and viscoelastic fluids, *Journal of Computational Physics*, 2010, Vol. 229, No. 2, pp. 498-511.
16. Shevtsov S. et al. Experimental and Numerical Study of Vacuum Resin Infusion for Thin-Walled Composite Parts, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 4, pp. 1485-1510.
17. Wei B.J. et al. Model-assisted control of flow front in resin transfer molding based on real-time estimation of permeability/porosity ratio, *Polymers*, 2016, Vol. 8, No. 9, pp. 337.
18. Wu J.-K. et al. Identification of thermoset resin cure kinetics using DSC and genetic algorithm, *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electric Engineering (ISEEE), Sapporo, Japan, 26-28 Apr. 2014*, pp. 1-14.
19. Govignon Q., Bickerton S., Kelly P.A. Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, Vol. 41, No. 1, pp. 45-57.
20. Gutowski T.G. et al. Consolidation experiments for laminate composites, *Journal of Composite Materials*, 1987, Vol. 21, No. 7, pp. 650-669.
21. Grimsley B.W. et al. Preform characterization in VARTM process model development, *Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, San Diego, US, 15-18 Nov. 2004*, pp. 1-14.
22. Joven R., Minaie B. Thermal properties of autoclave and out-of-autoclave carbon fiber-epoxy composites with different fiber weave configurations, *Journal of Composite Materials*, 2018, Vol. 52, No. 29, pp. 4075-4085.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Ю.Ф. Мигаль.

**Хуанг Чун-Пинь** – Южный федеральный университет; e-mail: jas3-3@hotmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; аспирант.

**Jyun-Ping Huang** – Southern Federal University; e-mail: jas3-3@hotmail.com; Rostov-on-Don; Russia; graduate student.

Е.Р. Мунтян, Э.В. Мельник

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
ГРАФОВ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ РАЗНОТИПНЫМИ СВЯЗЯМИ\***

*В статье рассмотрены вопросы построения отказоустойчивых вычислительных систем, в части структуры и резервирования. При проектировании распределенных вычислительных систем (ВС) возникает необходимость учета большого количества факторов, влияющих на производительность, надежность и отказоустойчивость. Для распределенных ВС к таким факторам относятся, в том числе структурные характеристики. В работе представлены графики зависимости вероятности безотказной работы ПУ распределенной вычислительной системы от характеристик ее структуры. Применение перспективных способов резервирования, таких как резервирование производительности, существенно повышает сложность задачи проектирования структуры. При резервировании производительности взамен ввода в систему специальных резервных узлов предполагается использование избыточных вычислительных ресурсов внутри задействованных процессорных узлов (ПУ). В случае отказа узла его задачи перераспределяются на свободный резерв работоспособных узлов. Для реализации такого способа резервирования системы требуется организация многопрограммного режима работы, когда на каждом узле могут одновременно выполняться несколько задач. Необходимость обеспечения мультипрограммного режима работы приводит к увеличению количества конфигураций системы, подлежащих анализу на этапе проектирования и в случае реконфигурации при отказе. Для снижения трудоемкости анализа отдельно взятой конфигурации предложен подход на основе графов с множественными и разнотипными связями. Использование моделей на основе таких графов позволяет представить структуру вычислительной системы с учетом мультипрограммной обработки информации и при этом существенно сократить время вычисления базовых характеристик за счет применения связей в виде вектора, позволяющих объединить несколько разнотипных связей.*

*Вычислительная система; граф; диаметр графа; множественные и разнотипные связи; мультипрограммная обработка; надежность.*

E.R. Muntyan, E.V. Melnik

**INVESTIGATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS  
OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS BASED ON GRAPHS  
WITH MULTIPLE EDGES OF DIFFERENT TYPES**

*The article considers the issues of fault-tolerant computing systems (CS) development in terms of their structure and redundancy. It is necessary to take into account a great amount of factors, which have an impact on performance, reliability and fault tolerance, during the distributed CS development. For distributed CS such factors contain, among other things, structural characteristics. The dependency graphs of processor nodes (PN) nonfailure operating probability of distributed CS against system structural characteristics are presented in the article. The application of advanced redundancy methods, such as performance redundancy, increases the complexity of structure design problem. In the case of performance redundancy, instead of adding redundant nodes to the system, it is proposed to use redundant computational resources among the involved processor nodes. If a node fails, its tasks are reallocated to a free reserve of nodes, which are able to work. To implement this method of system redundancy, the organization of a multi-program operation mode is required, when some tasks can be performed simultaneously on each node. Need for multi-program operation mode providing leads to increasing the number of system con-*

\* Работа выполнена ГЗ ЮНЦ РАН (№ гр проекта АААА-А19-11901190173-6) и гранта РФФИ 18-29-22086.

*figurations, which have to be analyzed on the design stage and in the case of reconfigurations when a failure takes place. To reduce the labour intensity of a configuration analysis an approach based on graphs with multiple edges of different types is proposed. The use of models based on such graphs makes it possible to represent the structure of CS taking into account a multi-program operation mode and at the same time significantly reduce the computational time of basic characteristics by means of applying relations in the form of a vector, which allows to integrate some relations of different types.*

*Computing system; graph; graph diameter; different types and multiple edges; multi-program operation mode; reliability.*

**Введение.** Характеристики надежности являются важными для широко круга вычислительных систем (ВС), применяемых в критических областях деятельности и для решения вычислительно сложных задач. Повышения характеристик надежности ВС можно достичь за счет применения высоконадежных компонентов, облегчения их режима работы, а также за счет реализации отказоустойчивости.

Объектом исследования являются отказоустойчивые вычислительные системы (ВС). Будем полагать, что исследуемые ВС содержат  $n$  процессорных узлов (ПУ) с одинаковыми характеристиками, на которых решается задача, включающая в свой состав  $t$  информационно связанных программ. Каждый  $i$ -й процессорный узел ПУ <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1..n}$ ) может работать в мультипрограммном режиме, при котором на каждом на нем выполняется несколько программ из состава решаемой задачи. Между каждой парой процессорных узлов имеется хотя бы один канал для передачи данных с учетом возможной транзитной передачи через другие узлы. В процессе проектирования системы необходимо:

- ◆ определить структуру, включая количество узлов и количество связей на узел;
- ◆ обеспечить определенные характеристики, влияющие на отказоустойчивость и живучесть ВС, в том числе:
  - максимально возможную структурную живучесть,
  - максимально возможную структурную коммутируемость,
  - минимальные структурные задержки при передаче информации между узлами.

Для повышения отказоустойчивости системы требуется предусмотреть возможности парирования отказов за счет заложенной избыточности. Структуру ВС, отвечающей выше перечисленным требованиям, будем считать оптимальной в случае минимальной избыточности в части дополнительных ПУ и каналов связи. Задача синтеза оптимальной структуры ВС, реализующей однопрограммный режим работы узлов, успешно решена при помощи вычисления характеристик графа [12]. Однако остается нерешенной задача поиска оптимальной структуры системы для многопрограммного режима работы, что обуславливает актуальность предложенных исследований. Для решения поставленной задачи целесообразно использовать модифицированные графовые подходы.

Для обеспечения отказоустойчивости и живучести ВС широко применяются различные способы резервирования ПУ [1, 2, 4], однако, в работе [3] предложен метод резервирования производительности, позволяющий улучшить показатели надежности (в частности, гамма-процентную наработку до отказа). Суть данного метода заключается в том, что в составе системы отсутствуют специально выделенные резервные ПУ, в решении задачи принимают участие все узлы, входящие в состав ВС. В случае возникновения отказа программы (подзадачи) с отказавших ПУ переносятся на свободные ресурсы работоспособных. Отсутствие специально выделенных резервных узлов (как например при скользящем резервировании [4]) позволяет равномерно распределить нагрузку между ПУ, что, в свою очередь, из-

за нелинейной зависимости интенсивности отказов компонентов ПУ от температуры (температура зависит от нагрузки) позволяет увеличить величину гамма-процентной наработки до отказа для ВС. Таким образом, резервирование производительности позволяет наряду с реализацией отказоустойчивости установить рациональную нагрузку компонентов ВС с целью повышения характеристик надежности. Однако при этом требуется решение задачи размещения нагрузки для узлов, работающих в многопрограммном режиме, что усложняет поиск работоспособных конфигураций в случае отказов, например, в сравнении со скользящим резервированием. Это требует разработки соответствующих моделей, методов и алгоритмов, в том числе предназначенных для исследования структуры ВС.

**1. Формальное описание графа с множественными и разнотипными связями.** Для исследования свойств структуры, влияющих на надежность ВС, целесообразно использование графовых моделей. В том числе, для решения такой задачи исследователями предложены графовые модели с однотипными неориентированными связями [5, 6], где в качестве узлов ВС выступают вершины модели, а каналы связи между узлами соответствуют ребрам (связям) графа. В рамках статьи графовую модель с однотипными неориентированными связями будем называть модель 1.

Однако, такие модели позволяют исследовать взаимодействие узлов, работающих в однопрограммном режиме. В случае, если речь идет о мультипрограммной обработке информации и резервировании производительности узлов ВС, возникает необходимость в использовании графов с разнотипными связями, например, описанных в работах [7, 8]. Такие графы позволяют задать разнотипные вершины, разнотипные, в том числе и кратные, ребра между вершинами (далее будем называть модель 2). В тоже время увеличение количества связей в графе ведет к росту временных затрат на организацию вычислений в модели.

С целью снижения времени вычисления характеристик графов, задающих разнотипные отношения, предложено использование множественных связей в виде вектора, каждая из которых позволяет объединить несколько разнотипных связей. В работах [9–11] для представления объектов сложных технических систем используется графовая модель, которая учитывает однотипные, разнотипные и множественные связи в виде вектора (далее будем называть модель 3). Формально такой граф задан в виде:

$$G' = (G'v, G'e), \quad (1)$$

где  $G'v = \{gv_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $G'e = \{ge_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$  – соответственно, конечные множества вершин с атрибутами  $gv_i$  (*graph vertex*) и ребер с атрибутами  $ge_j$  (*graph edge*). Вершины графа могут быть однотипными и разнотипными. Адресация к вершинам и ребрам графа выполняется через их идентификаторы. В качестве атрибутов вершин могут выступать их весовые коэффициенты, а в качестве атрибутов ребер – веса, ориентация, вид связи.

Ребра могут быть ориентированными (связи  $gv_i \rightarrow gv_j$ ) или неориентированными (связи  $gv_i - gv_j$ ), а также – однотипными (связи  $gv_i - gv_j$  и  $gv_i \rightarrow gv_j$ ), разнотипными (связи  $gv_i - tp - gv_j$  и  $gv_i - tp \rightarrow gv_j$ , где  $tp$  – *type*) и множественными в виде вектора (связи  $gv_i - \bar{v} \rightarrow gv_j$  и  $gv_i - \bar{v} - gv_j$ ). Ребро в виде вектора позволяет объединить  $t$  разнотипных связей и представляется в виде  $\bar{v} = \langle v_1, v_2, \dots, v_t \rangle$ , где  $t$  – размерность вектора или кратность ребра  $\bar{v}$ .

Весу вершины ( $\eta_i \in [0, 1]$ ) и связи ( $\mu_i \in [0, 1]$ ) в графе может придаваться смысл меры достоверности или степени принадлежности нечеткому множеству. Степени принадлежности присутствуют в списках, задающих граф. Они могут определяться экспертом или вычисляться посредством фаззификации [12].

Рассмотрим возможности и целесообразность применения моделей 1–3, для представления структуры системы. Предварительно сформулируем общие требования к графовым моделям в зависимости от задач предметной области. Для современных ВС характерна определенная унификация, как в части вычислительных ресурсов, так и в отношении каналов связи. Для реализации вычислений в ВС, как правило, используются одинаковые процессорные узлы. Каналы связи между узлами обычно являются двунаправленными. Следовательно, графы, представляющие ВС тоже должны обладать определенной долей унификации. Например, в работах [3, 5, 14] предложено использование однородных (регулярных или циркулянтных) графов, т.е. графов с вершинами, локальные степени которых совпадают:  $\forall i \neq j: s_i = s_j$ . Такие графы целесообразно задавать множеством однотипных вершин и множеством неориентированных связей.

Вычисление некоторых характеристик графа позволяет определить ряд параметров вычислительной системы. Например, структурные задержки при передаче информации между узлами системы оцениваются диаметром и средним диаметром графа. В работах [13–15] отмечается улучшение показателей структурной живучести и структурной коммутируемости системы при условии минимизации диаметра и среднего диаметра графа. Даже незначительное уменьшение среднего диаметра значительно снижает среднее время передачи данных. Подчеркивается, что структуры с минимальным средним диаметром являются оптимальными при реализации децентрализованных алгоритмов самодиагностики в ВС. Кроме того, при проектировании системы отмечается необходимость минимизации диаметра и/или среднего диаметра графа, что обусловлено необходимостью сокращения числа межмодульных обменов при решении задач [14]. Следовательно, для повышения надежности систем исследуемого класса важное значение имеет поиск структур системы с минимальными характеристиками диаметра и среднего диаметра графа. Подходы к решению этой задачи предложены в работах ряда ученых [13, 14, 16], поэтому вопросы определения структуры системы с минимальными метрическими характеристиками лежат за рамками данной статьи.

Таким образом, при проектировании системы, а также при проведении мероприятий обеспечения отказоустойчивости ВС, приводящих к изменению структуры, возникает задача многократного вычисления диаметра и среднего диаметра графа, что накладывает требования минимизации временных затрат. Кроме того, использование нестандартных графовых моделей для обеспечения мультипрограммного режима работы вычислителей вынуждает исследователей искать новые или модернизировать существующие методы определения таких характеристик.

Далее авторами предлагаются подходы к определению характеристик графа с множественными и разнотипными связями с целью исследования свойств структуры, влияющих на надежность ВС.

**2. Описание исследуемых характеристик графа.** Ниже определены некоторые метрические характеристики неориентированного графа с однотипными связями  $G$  и дана их возможная интерпретация для представления ряда параметров вычислительной системы. Диаметр графа  $d(G)$  – максимальное расстояние между парами вершин [17] и может быть определен стандартными средствами:

$$d(G) = \max_{i,j=1}^n \{d(gv_i, gv_j)\}, \quad (2)$$

где  $d(gv_i, gv_j)$  – расстояние между вершинами  $gv_i$  и  $gv_j$ .

Диаметр графа является количественной характеристикой для максимальных структурных задержек и соответствует максимальному количеству узлов, необходимых для межмашинного обмена информацией.

Средний диаметр графа  $\bar{d}(G)$  в соответствии с работой [14] можно вычислить по формуле:

$$\bar{d}(G) = \frac{\sum_{i \neq j, i, j=1}^n d(gv_i, gv_j)}{n(n-1)}. \quad (3)$$

Средний диаметр позволяет оценить среднюю задержку при выполнении межмашинных взаимодействий.

При этом необходимо отметить, что помимо задержек, увеличение диаметра и среднего диаметра для распределенной вычислительной системы приводит к росту вычислительной нагрузки на ПУ. Это связано с тем, что транзитная передача данных требует дополнительных действий со стороны узла, т.е. выполнения дополнительной работы [18], а при увеличении диаметра (среднего диаметра) как раз имеет место увеличение количества случаев такой транзитной передачи.

Для оценки влияния величины характеристик структуры системы на объем дополнительной работы при решении поставленной задачи целесообразно использовать средний диаметр, т.к. данный параметр учитывает возможности передачи данных между всеми узлами. Пусть для выполнения транзитной передачи данных от одного узла другому необходимо выполнить одинаковый объем дополнительной работы  $L_{\text{тр}}$  на каждом транзитном узле. Будем считать, что каждый узел взаимодействует с  $r$  другими узлами, тогда общее число каналов взаимодействия между всеми узлами равно  $n \cdot r$ , средняя нагрузка на один узел по транзитной передаче (отношение всей нагрузки по транзитной передаче данных к числу узлов) при информационном взаимодействии всех узлов составит:

$$L_{\text{тр уз}} = \frac{n \cdot r \cdot \bar{d} \cdot L_{\text{тр}}}{n} = r \cdot \bar{d} \cdot L_{\text{тр}}$$

В работах [19, 20] предложен следующий подход в части определения надёжности системы: вероятность безотказной работы узлов зависит от температуры их компонентов (при увеличении температуры компонентов на 10 °С интенсивность отказов удваивается), которая, в свою очередь, зависит от вычислительной нагрузки:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{\frac{kL}{10}t}},$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов без нагрузки;

$L$  – вычислительная нагрузка узла (доля от максимальной);

$k$  – коэффициент, отражающий зависимость температуры от нагрузки, определяемый как разность температуры компонентов при максимальной нагрузке и их температуры без нагрузки.

С учетом того, что нагрузка каждого узла включает нагрузку от транзитной передачи данных ( $L = L_{\text{осн}} + L_{\text{тр уз}}$ , где  $L_{\text{осн}}$  – нагрузка, связанная с вычислениями), вероятность безотказной работы можно определить по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{\frac{k(L_{\text{осн}} + L_{\text{тр уз}})}{10}t}} = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{\frac{k(L_{\text{осн}} + r \cdot \bar{d} \cdot L_{\text{тр}})}{10}t}}.$$

На рис. 1 представлены сравнительные данные по зависимости вероятности безотказной работы отдельных узлов от среднего диаметра для системы, включающей 30 узлов, при  $L_{\text{тр}} = 0,005$  (0,5% от максимально допустимой нагрузки),  $k = 30$  и  $r = 10$  (рис. 1,а) и  $r = 20$  (рис. 1,б). Представленные данные показывают существенное влияние среднего диаметра на вероятность безотказной работы узлов системы даже при достаточно низких величинах дополнительной нагрузки от транзитной передачи: в представленном примере уменьшение среднего диаметра позволяет увеличить гамма-процентную наработку на отказ на 5% и 10% соответственно.

Очевидно,  $d(G)$  и  $\bar{d}(G)$  зависят от расстояния между вершинами графа. Кратчайшим путем или расстоянием между вершинами в неориентированном графе с однотипными связями  $d(gv_i, gv_j)$  считается наименьшая из всех возможных последовательностей ребер  $Sg = (\dots, ge_1, ge_2, \dots, ge_m, \dots)$ , таких, что каждые два соседних ребра  $ge_{j-1}$  и  $ge_j$  имеют общую концевую точку [17]. Однако, возникает вопрос определения расстояния в графе с множественными разнотипными связями.

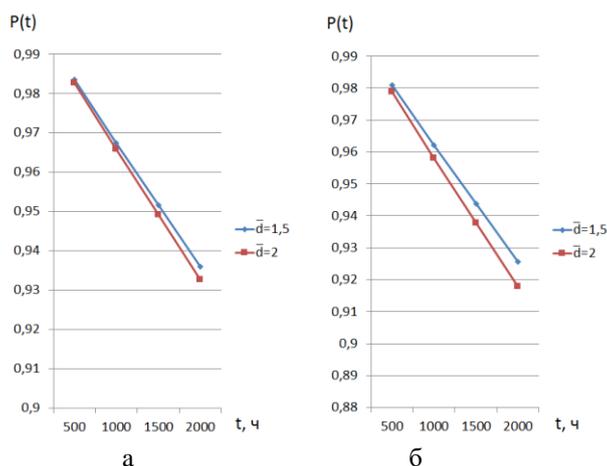


Рис. 1. Оценка влияния среднего диаметра графа на вероятность безотказной работы узлов

Поиск путей в таком графе возможен по всем видам связи (1 случай, когда исследуется граф целиком) или же по выбранному виду связи (2 случай, когда исследуется подграф), например по заданному типу ребра, или по ребру в векторе с определенным индексом. Поиск путей во втором случае целесообразен для исследования выбранных связей, необходимых исследователю в данный момент. Движение по графу выполняется только по заданному подмножеству ребер, остальные ребра при этом временно игнорируются. Обобщив выше сказанное можно сформулировать критерий вычисления кратчайшего пути такого графа: кратчайший путь в графе с множественными разнотипными связями вычисляется с учетом полного или усеченного множества связей. Следовательно, метрики графа могут вычисляться для всего графа целиком или для каждого отдельного типа ребер в зависимости от требований задач предметной области, что не накладывает ограничения на использование формул (2) и (3) для модели, заданной в соответствии с (1).

**3. Практическая реализация.** В работе [22] рассмотрены модели 1–3 для системы, состоящей из восьми процессорных узлов ПУ<sub>1</sub> – ПУ<sub>8</sub>, каждый из которых имеет каналы связи с тремя соседними узлами. Моделирование и вычисление характеристик рассмотренных ниже графов выполнено в разработанном программном модуле (ПМ) [23]. Для моделирования ВС используются однородные графы степени  $S(G)$  с однотипными вершинами ( $gv_i$ ) и неориентированными ребрами ( $ge_j$ ).

При этом, модель 1 задана графом  $G'_1 = (G'_1v_1, G'_1e_1)$ , где  $G'_1v_1 = \{gv_1, gv_2, \dots, gv_8\}$  – множество вершин,  $G'_1e_1 = \{ge_1, ge_2, \dots, ge_{12}\}$  – множество однотипных связей. Степень графа  $S(G'_1) = 3$ . В такой модели каждая вершина  $gv_i$  из множества  $G'_1v_1$  представляет ПУ<sub>*i*</sub>, а весу вершины  $\eta_i$  придается смысл степени загрузки узла. Связи между вершинами  $ge_j$  соответствуют каналам связи между узлами, а вес связи – степени загруженности каналов. Для оценки значения показателей весов вершин и ребер графа  $G'_1$  введено вербальное описание (табл. 1).

Граф  $G'_1$  позволяет представить ВС, состоящую из узлов, работающих в однопольном режиме. Рассмотрим две ситуации:

- 1) при проектировании системы, где с целью обеспечения живучести предусмотрено резервирование производительности структуры;
- 2) при реконфигурации системы, работающей на пределе возможностей (когда не осталось резерва производительности вычислителей).

Таблица 1

#### Оценка значения показателя весов вершин и ребер

Возможное вербальное описание показателя	Диапазон численных значений весов
Отсутствует	0
Слабый показатель	[0,1; 0,4]
Умеренный показатель	[0,41; 0,7]
Сильный показатель	[0,71; 1,0]

*Ситуация 1.* В графе  $G'_1$  веса вершин и ребер принимают следующие значения:  $\eta_i = 0,7$ ,  $\mu_j = 0,7$  (см. табл. 2). Такие значения характеристик графа соответствуют умеренному показателю загрузки узлов и каналов связи в системе. Для графа определены диаметр  $d_1(G'_1)$  и средний диаметр  $\bar{d}_1(G'_1)$ . Таким образом, при проектировании системы предусмотрен резерв производительности узлов около 30%, также отмечается недогруженность каналов связи в целом на  $\approx 30\%$ . При этом максимальная структурная задержка для межмашинного обмена информацией в системе соответствует значению «2,1», а средняя задержка при выполнении межмашинных взаимодействий – значению «1,1».

Таблица 2

#### Значения характеристик графа $G'_1$

Характеристики графа	Значения характеристик графа с учетом резерва производительности вычислителей:	
	имеется резерв	отсутствует резерв
Вес вершин $\eta_i$	0,7	1,0
Вес связей $\mu_j$	0,7	1,0
Диаметры графа $d_1(G'_1)$ и $d_2(G'_1)$	2,1	3,0
Средние диаметры графа $\bar{d}_1(G'_1)$ и $\bar{d}_2(G'_1)$	1,1	1,7

*Ситуация 2.* Если в определенный момент времени в системе отсутствует резерв производительности узлов и каналы связи максимально загружены, то в модели это может быть отражено за счет определенных значений весовых коэффициентов. Тогда в графе  $G'_1$  веса вершин и ребер принимают следующие значения:  $\eta_i = 1$ ,  $\mu_j = 1$ . В табл. 2 представлены результаты вычисления диаметра графа  $d_2(G'_1)$  и среднего диаметра графа  $\bar{d}_2(G'_1)$ . Таким образом, определены максимальная и средняя структурные задержки межмашинного взаимодействия в системе на пике производительности (соответственно значения 3,0 и 1,7). Время, затраченное на вычисление таблицы кратчайших путей и определение метрических характеристик в ПМ для графа  $G'_1$  – 5 ms.

Модель 2 задана графом  $G'_2 = (G'v_2, G'e_2)$ , где  $G'v_2 = \{gv_1, gv_2, \dots, gv_8\}$  – множество вершин и  $G'e_2 = \{ge_1, ge_2, \dots, ge_{36}\}$  – множество разнотипных связей. Степень графа  $S(G'_2) = 3$ . В такой модели каждая вершина  $gv_i$  из множества  $G'v_2$  соответствует ПУ<sub>*i*</sub>, а вес вершины  $\eta_i$  – степени загрузки узла. В модели 2 пары вершин

соединены  $tp$ -кратными ребрами разного типа, где численное значение  $tp$  соответствует возможному количеству программ, запущенных на ПУ. Поясним назначение разнотипных ребер на примере. Если на каждом узле может выполняться параллельно 3 программы, то передачу результатов вычисления должны обеспечить  $tp = 3$  каналов связи. Тогда с учетом сказанного для данной модели каждое ребро из графа  $G'_1$  фактически заменяется тремя ребрами разного типа. Разнотипные связи между вершинами  $ge_j$  соответствуют каналам связи узлов с учетом мультипрограммной обработки информации, а вес связи – степени загруженности каждого канала. Вербальное описание, представленное в табл. 1, также используется для оценки значения показателей весов вершин и ребер графа  $G'_2$ .

Информационно связанные программы располагаются на имеющих прямой канал связи ПУ, поэтому транзитная передача данных через узлы отсутствует. При необходимости отразить такую передачу можно, если учесть в составе каждого из узлов служебную программу для трансляции транзитных данных. В этом случае количество каналов связи будет на один больше.

Граф  $G'_2$ , в отличие от  $G'_1$ , позволяет представить узлы, работающие в мультипрограммном режиме. Однако, недостатком модели 2 по сравнению с моделью 1 является необходимость использования кратных связей в графе в соответствии с мультипрограммным режимом работы вычислителей и требованиями отказоустойчивости ВС. Так, количество связей в графе  $G'_2$  в три раза больше по сравнению с графом  $G'_1$ , что приводит к росту временных затрат на организацию вычислений. Например, время, затраченное на вычисление таблицы кратчайших путей и определение метрических характеристик в ПМ для графа  $G'_2$  – 28 ms.

Для решения этой проблемы предложено использование графов, учитывающих множественные связи в виде вектора [9]. Каждая множественная связь в виде вектора представляет собой объединение нескольких разнотипных связей. Такие возможности предоставляет модель 3.

Если в системе на каждом узле может быть запущено не более 3 программ, то с учетом множественных связей в виде вектора модель 3 может быть представлена в виде графа  $G'_3 = (G'v_3, G'e_3)$ , где  $G'v_3 = \{gv_1, gv_2, \dots, gv_8\}$  – множество вершин,  $G'e_3 = \{ge_1, ge_2, \dots, ge_{12}\}$  – множество связей в виде вектора (рис. 2). Степень графа  $S(G'_3) = 3$ . При этом каждое ребро  $ge_i$  представлено вектором  $\bar{v} = \langle v_1, v_2, v_3 \rangle$ .

Ребра внутри вектора имеют свою идентификацию и отдельный вес, который соответствует степени загруженности канала при выполнении одной из задач. Для оценки значения показателей весов вершин и ребер графа  $G'_3$  используется вербальное описание, представленное в табл. 1.

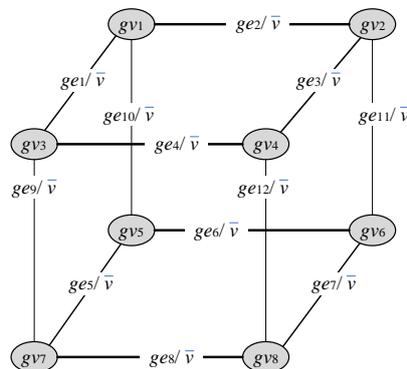


Рис. 2. Граф  $G'_3$  с учетом множественных связей в виде вектора

Новизной предложенного подхода является возможность определения метрических характеристик для подграфа, учитывающего определенный вид связи, например, связи по вектору  $v_1$ , или  $v_2$ , или  $v_3$ . Это соответствует критерию вычисления кратчайшего пути графа с множественными разнотипными связями, обозначенному авторами в разд. 2. Рассмотрим ситуации, аналогично как для графа  $G'_1$ .

*Ситуация 1.* На этапе проектирования системы в графе  $G'_3$  веса вершин  $\eta_i = 0.7$ , что соответствует умеренному показателю загрузки узлов системы (резерв производительности около 30%). Веса ребер в векторе  $v_1$   $\mu_{j,1} = 0$ , а в векторах  $v_2$  и  $v_3$  принимают различные значения, соответствующие сильному показателю загрузки канала связи, например,  $\mu_{j,2} = 0.8$ ,  $\mu_{j,3} = 1.0$ . При этом очевидно, что канал связи, соответствующий вектору  $v_1$ , не загружен, т.е. в полной конфигурации аппаратных средств не запущена одна программа, соответственно, одна связь тоже не задействована. В таком случае резерв производительности узлов и свободный канал связи могут использоваться для выполнения отдельных программ (подзадач) в случае возникновения отказа не более 30% вычислительного и коммуникационного ресурса системы.

Получены характеристики диаметра и среднего диаметра графа для каждого вида связи в векторе отдельно (см. табл. 3). Анализ результатов вычисления метрик графа позволяет сделать вывод, что на этапе проектирования в системе имеется резервный (ненагруженный) канал связи, который соответствует ребрам вида  $v_1$  графа  $G'_3$ . При этом резерв производительность вычислителей около 30 %.

Таблица 3

Значения характеристик графа  $G'_3$ 

Характеристики графа	Значения характеристик графа с учетом резерва производительности вычислителей:					
	имеется резерв			отсутствует резерв		
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_1$	$v_2$	$v_3$
Вес вершин $\eta_i$	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0
Веса связей $\mu_{j,1}$ , $\mu_{j,2}$ и $\mu_{j,3}$	0	0,8	1,0	0,9	0,8	1,0
Диаметры графа $d_1 (G'_3)$ и $d_2 (G'_3)$	0	2,4	3,0	2,7	2,4	3,0
Средние диаметры графа $\bar{d}_1 (G'_3)$ и $\bar{d}_2 (G'_3)$	0	1,3	1,7	1,5	1,3	1,7

*Ситуация 2.* В результате отказа двух узлов в системе был задействован имеющийся вычислительный резерв. Теперь в графе  $G'_3$  веса вершин и ребер принимают следующие значения:  $\eta_i = 1,0$ ,  $\mu_{j,1} = 0,8$ ,  $\mu_{j,2} = 0,9$ ,  $\mu_{j,3} = 1,0$ . Метрики такого графа представлены в табл. 3. В результате анализа характеристик текущего графа можно сделать вывод о том, что в системе отсутствует резерв производительности узлов, а загруженность каналов связи соответствует сильному показателю.

Преимущество предложенной модели 3 заключается в возможности представления ВС в условиях мультипрограммной обработки информации, как в модели 2, с сохранением числа связей, как в модели 1. При этом время вычисления таблицы кратчайших путей и метрических характеристик в ПМ для графа  $G'_3$  – 12ms.

Для сравнения демонстрации преимуществ модели 3 в статье предложена реализация графа  $G'_4 = (G'_4, G'_4)$ , где  $G'_4 = \{gv_1, gv_2, \dots, gv_8\}$  – множество вершин,  $G'_4 = \{ge_1, ge_2, \dots, ge_{12}\}$  – множество связей в виде вектора (рис. 2). Степень графа  $S(G'_3) = 3$ . При этом каждое ребро  $ge_i$  представлено вектором  $v = \langle v_1, v_2, v_3 \rangle$ .

Ребра внутри вектора имеют свою идентификацию и отдельный вес, который соответствует степени загруженности канала при выполнении одной из задач. Для оценки значения показателей весов вершин и ребер графа  $G'_3$  используется вербальное описание, представленное в табл. 1.

**4. Результаты экспериментальных исследований моделей на основе графов в ПМ.** Для проведения экспериментов на графах были отобраны модели 2 и 3, так как они позволяют задать мультипрограммный режим работы узлов в системе. В рамках каждой модели использовано по 10 графов различной размерности (10–100 вершин). Вычисление метрик исследуемых графов выполнено в разработанном программном модуле.

В работе [22] приведен график зависимости времени вычисления метрических характеристик, включая формирование таблицы кратчайших путей, от размера графа в моделях 2 и 3. Анализ результатов экспериментальных исследований на графах в ПМ показал преимущества модели 3 за счет использования множественных связей в виде вектора. Например, для графов размером 10–100 вершин время поиска кратчайших путей и вычисления метрик для модели 3 в 3,4–5,6 раз меньше, чем для модели 2.

**Заключение.** Предложено использование графовых моделей с учетом множественных связей в виде вектора для представления узлов и каналов связи в однородных вычислительных системах, поддерживающих мультипрограммную обработку информации. Такие модели позволяют снизить временные затраты при разработке структуры и конфигураций отказоустойчивых ВС на основе резерва производительности ПУ и загруженности каналов связи: для измерения структурных задержек при передаче информации в системе требуется решение задачи определения метрик модели, в том числе максимального и среднего диаметра графа.

В статье показана зависимость вероятности безотказной работы ПУ распределенной вычислительной системы от характеристик ее структуры. Особое внимание уделено особенностям процесса вычисления метрических характеристик в предложенных графах.

Для графов с учетом множественных связей в виде вектора сформулированы критерии вычисления кратчайшего пути. Новизной предложенных подходов является возможность учета выбранного подмножества связей при вычислении метрических характеристик графа.

Проведены экспериментальные исследования над графовыми моделями, которые позволяют представить мультипрограммный режим работы узлов в ВС. Результаты проведенных экспериментов на графах в разработанном программном модуле показали преимущества предложенной модели за счет использования множественных связей в виде вектора. В том числе, для графов размером 10–100 вершин время поиска кратчайших путей и вычисления метрик в предложенной модели сокращается в 3,4–5,6 раз по сравнению с другой моделью, поддерживающей мультипрограммную обработку информации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хорошевский В.Г.* Архитектура вычислительных систем: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 520 с.
2. *Zhang Y., Jiang J.* Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // *Annual Reviews in Control.* – 2008. – Vol. 32 (2). – P. 229-252.
3. *Kalyaev I., Melnik E., Korovin I., Klimenko A. and Schaefer G.* A Fog-computing Based Method of Information and Control System Reliability Enhancement // *7th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology.* Piscataway Piscataway, New Jersey: IEEE, 2008. – P. 582-587.
4. *Akkaya M.* Fault tolerance Mechanisms in Distributed Systems // *Int. J. Communications, Network and System Sciences.* – 2015. – Vol. 8. – P. 478-482.
5. *Кузнецов А.А., Кишкан В.В.* Исследование графов Кэли конечных двупорожденных бернсайдовых групп периода семь // *Сибирский журнал науки и технологий.* – 2018. – Т. 19, № 2. – С. 217-222. – Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-217-222.

6. *Parkhomenko P.P.* Shaped lattice graphs as models of the multiprocessor computer systems // Automation and Remote Control. – 2005. – Vol. 66. – P. 492-502.
7. *Boccaletta S., Bianconic G., Criadod R., del Geniof C.I., Gómez-Gardeñesi J., Romanced M., Sendiña-Nadalj I., Wangk Z., Zaninm M.* The structure and dynamics of multilayer networks // Preprint submitted to Physics Reports July 16, 2014. – 157 p.
8. *Contractor N.S., Monge P.R., Leonardi P.M.* Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network // International Journal of Communication. – 2011. – No. 5. – P. 682-720.
9. *Мунтян Е.Р.* Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 411-418. – Doi:10.15827/0236-235X.127.411-418.
10. *Мунтян Е.Р.* Представление знаний в граф-моделях сложных технических систем // Информатизация и связь. – 2020. – № 3. – С. 12-16. – Doi: 10.34219/2078-8320-2020-11-3-12-16.
11. *Мунтян Е.Р.* Трехуровневая модель представления знаний на основе графов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 145-157. – Doi: 10.23683/2311-3103-2019-5-145-157.
12. *Аверкин А.Н., Батыршин И.З. и др.* Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
13. *Sampes M.* Caylay graphs as interconnection networks: A case study // Proc. of the Inter. Conf. Parsells'96. – Berlin: Akademie-Verlag. 1996. – P. 97-106.
14. *Дмитриев Ю.К.* Анализ самодиагностирующих свойств структур распределенных живучих вычислительных систем // Автометрия. – 1996. – № 5. – С. 71-84.
15. *Воробьев В.А., Корнев В.В.* Некоторые вопросы теории структур однородных вычислительных систем // Вычислительные системы // Вопросы теории и построения ВС. – Новосибирск. 1974. – Вып. 60. – С. 3-16.
16. *Монахов О.Г., Монахова Э.А.* Параллельные системы с распределенной памятью: структуры и организация взаимодействий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 242 с.
17. *Оре О.* Теория графов: пер. с англ. – М.: Наука, 1968. – 352 с..
18. *Клименко А.Б., Мельник Я.Э.* Исследование возможности применения концепции туманных вычислений и технологии распределенного реестра при построении информационно-управляющих систем // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 19-27.
19. *Melnik E., Klimenko A., Klimenko V.* A recovery technique for the fog-computing-based information and control systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 860. – P. 216-227.
20. *Melnik E.V., Klimenko A.B.* A workload distribution problem model and online constraint forming technique for the control systems in the fog-computing environment // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – P. 042014. – Doi: 10.1088/1742-6596/1333/4/042014.
21. *Меленьтев В.А.* Аналитический подход к синтезу регулярных графов с заданными значениями порядка, степени и обхвата // Прикладная дискретная математика. – 2010. – № 2 (8). – С. 74-86.
22. *Muntyan E.R., Melnik E.V.* The graph-based analysis of structural delays in distributed multiprogram systems of information processing // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661 (1). – Doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012061.
23. *Мунтян Е.Р.* Программный модуль для представления акторов и отношений между акторами на основе графов. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018665499, зарег. 05.12.2018. – М.: Роспатент, 2018.
24. *Мунтян Е.Р.* Разработка и исследование моделей графов и гиперграфов с учетом множественных и разнотипных связей: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.13.17). – Таганрог: ЮФУ., 2020. – 20 с.
25. *Kolodenkova A.E. and Muntyan E.R.* Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling // Papers in English 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE, 2018. – Vol. 8. – P. 127-131. – Doi: 10.1109/APEIE.2018.8545550.

## REFERENCES

1. *Khoroshevskiy V.G.* Arkhitektura vychislitel'nykh sistem: ucheb. posobie [Architecture of computing systems: textbook]. 2nd ed., reprint. and add. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2008, 520 p.
2. *Zhang Y., Jiang J.* Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, 2008, Vol. 32 (2), pp. 229-252.
3. *Kalyaev I., Melnik E., Korovin I., Klimenko A. and Schaefer G.* A Fog-computing Based Method of Information and Control System Reliability Enhancement, *7th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology. Piscataway Piscataway, New Jersey: IEEE, 2008*, pp. 582-587.
4. *Akkaya M.* Fault tolerance Mechanisms in Distributed Systems, *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, 2015, Vol. 8, pp. 478-482.
5. *Kuznetsov A.A., Kishkan V.V.* Issledovanie grafov Keli konechnykh dvuporozhdennykh bernsaydovykh grupp perioda sem' [The Cayley graphs of finite two-generator burnside groups of exponent 7], *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii* [Siberian Journal of Science and Technology], 2018, Vol. 19, No. 2, pp. 217-222. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-217-222.
6. *Parkhomenko P.P.* Shaped lattice graphs as models of the multiprocessor computer systems, *Automation and Remote Control*, 2005, Vol. 66, pp. 492-502.
7. *Boccaletta S., Bianconic G., Criadod R., del Geniof C.I., Gómez-Gardeñesi J., Romanced M., Sendiña-Nadalj I., Wangk Z., Zaninm M.* The structure and dynamics of multilayer networks, *Preprint submitted to Physics Reports July 16, 2014*, 157 p.
8. *Contractor N.S. Monge P.R., Leonardi P.M.* Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network, *International Journal of Communication*, 2011, No. 5, pp. 682-720.
9. *Muntyan E.R.* Realizatsiya nechetkoy modeli vzaimodeystviya ob"ektov slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove grafov [Realization of fuzzy model of objects interaction inside a complex technical systems based on graphs], *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2019, Vol. 32, No. 3, pp. 411-418. Doi:10.15827/0236-235X.127.411-418.
10. *Muntyan E.R.* Predstavlenie znaniy v graf-modelyakh slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Representation of knowledge in graph models of complex technical systems], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2020, No. 3, pp. 12-16. Doi: 10.34219/2078-8320-2020-11-3-12-16.
11. *Muntyan E.R.* Trekhurovnevaya model' predstavleniya znaniy na osnove grafov [Three-level model of knowledge representation based on graphs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5, pp. 145-157. Doi: 10.23683/2311-3103-2019-5-145-157.
12. *Averkin A.N., Batyrshin I.Z. i dr.* Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya iskusstvennogo intellekta [Fuzzy sets in artificial intelligence control models], ed. by D.A. Pospelova. Moscow: Nauka, 1986.
13. *Sampes M.* Caylay graphs as interconnection networks: A case study, *Proc. of the Inter. Conf. Parsells '96*. Berlin: Akademie-Verlag. 1996, pp. 97-106.
14. *Dmitriev Yu.K.* Analiz samodiagnostiruyushchikhsya svoystv struktur raspredelennykh zhivuchikh vychislitel'nykh sistem [Analysis of self-diagnosing properties of structures of distributed tenacious computing systems], *Avtometriya* [Auto-measurement], 1996, No. 5, pp. 71-84.
15. *Vorob'ev V.A., Kornev V.V.* Nekotorye voprosy teorii struktur odnorodnykh vychislitel'nykh sistem Vychislitel'nye sistemy [Some questions of the theory of structures of homogeneous computing systems], *Voprosy teorii i postroeniya VS* [Questions of the theory and construction of CS]. Novosibirsk. 1974, Issue 60, pp. 3-16.
16. *Monakhov O.G., Monakhova E.A.* Parallel'nye sistemy s raspredelennoy pamyat'yu: struktury i organizatsiya vzaimodeystviy [Parallel Systems with Distributed Memory: Structures and Organization of Interactions]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, 242 p.
17. *Ore O.* Teoriya grafov [Theory of graphs]: transl. from engl. Moscow: Nauka, 1968, 352 p..
18. *Klimenko A.B., Mel'nik Ya.E.* Issledovanie vozmozhnosti primeneniya kontseptsii tumannykh vychisleniy i tekhnologii raspredelennogo reestra pri postroenii informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Investigation of the possibility of applying the concept of fog computing and distributed registry technology in the construction of information and control systems], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2021, No. 2, pp. 19-27.

19. Melnik E., Klimenko A., Klimenko V. A recovery technique for the fog-computing-based information and control systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, Vol. 860, pp. 216-227.
20. Melnik E.V., Klimenko A.B. A workload distribution problem model and online constraint forming technique for the control systems in the fog-computing environment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1333, pp. 042014. Doi: 10.1088/1742-6596/1333/4/042014.
21. Melen'tev V.A. Analiticheskiy podkhod k sintezu regulyarnykh grafov s zadannymi znacheniyami poryadka, stepeni i obkhvata [Analytical approach to the synthesis of regular graphs with given values of order, degree, and girth], *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied Discrete Mathematics], 2010, No. 2 (8), pp. 74-86.
22. Muntyan E.R., Melnik E.V. The graph-based analysis of structural delays in distributed multiprogram systems of information processing, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1661 (1). Doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012061.
23. Muntyan E.R. Programmnyy modul' dlya predstavleniya aktorov i otnosheniy mezhdru aktorami na osnove grafov. Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM № 2018665499, zareg. 05.12.2018 [Certificate of official registration of a computer program No. 2018665499, "A software module for representing actors and relationships between actors based on graphs", registered 05.12.2018]. Moscow: Rospatent, 2018.
24. Muntyan E.R. Razrabotka i issledovanie modeley grafov i gipergrafov s uchetom mnozhestvennykh i raznotipnykh svyazey: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of models of graphs and hypergraphs taking into account multiple and different types of edges: cand. of eng. sc. diss.] (05.13.17). Taganrog: YuFU, 2020, 20 p.
25. Kolodenkova A.E. and Muntyan E.R. Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling, *Papers in English 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE, 2018*, Vol. 8, pp. 127-131. Doi: 10.1109/APEIE.2018.8545550.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

**Мунтян Евгения Ростиславна** – Южный федеральный университет; e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371608; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

**Мельник Эдуард Всеволодович** – Южный научный центр РАН; г. Ростов-на-Дону, Россия; д.т.н.; г.н.с.

**Muntyan Evgenia Rostislavna** – Southern Federal University; e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371608; the department of computer science; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Melnik Eduard Vsevolodovich** – Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Rostov-on-Don, Russia; dr. of eng. sc.; chief researcher.

УДК 629.735.4

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-198-209

**О.Ю. Воронков**

### **СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»**

*Работа посвящена синергетическому синтезу астатического гарантирующего регулятора для иерархической системы управления летательным аппаратом. Статья содержит общее описание вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» и астатического гарантирующего регулятора на основе интеграторов. Астатический регулятор должен обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы, выполнение технологических инвариантов, оценку неизмеряемых внешних воздействий по текущим значениям измеряемых координат состояния и парирование кусочно-постоянных внешних*

возмущений (например, ветровых), приводящих к случайным изменениям высоты полёта, углов тангажа и крена. Также в статье приведена расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних кусочно-постоянных возмущающих воздействий, включающая уравнения оценок возмущений, и на основе заданных технологических инвариантов синтезированы алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Кроме этого, приведены уравнения интеграторов, которые обязаны входить в состав астатического регулятора и связаны с уравнениями оценок возмущающих воздействий. В рамках синергетической теории управления интеграторы не приводят к ухудшению устойчивости замкнутой системы, потому что метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов гарантирует асимптотическую устойчивость динамической системы. Наконец, показаны результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики верхнего и нижнего уровней иерархии в условиях возмущённого движения с парированием внешних возмущений интеграторами астатического регулятора, а также результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики аппарата в условиях возмущённого движения без этого регулятора для возможности наглядной оценки качества работы регулятора путём сравнения. Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» для повышения эффективности спасения людей из зон бедствий, где вертолёты и другие современные средства не справляются с задачами. Научная новизна работы заключена в применении синергетических подходов к разработке системы балансировки пространственного положения аппарата, оснащённой астатическим гарантирующим регулятором для парирования возмущающих воздействий.

«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; наихудшие возмущения; астатический гарантирующий регулятор.

**O.Yu. Voronkov**

#### **SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN ASTATIC CONTROLLER FOR THE “FLYING PLATFORM” CONTROL SYSTEM**

*The work is devoted to the synergetic synthesis of the astatic guaranteeing controller for the aircraft hierarchical control system. The paper contains the general description of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft & an integrator-based astatic guaranteeing controller. An astatic controller must ensure the asymptotic stability of a reserved system, the implementation of technological invariants, the estimation of immeasurable external influences from the current values of the measurable state-space variables, & the parry of piecewise constant external disturbances (for example, wind) that cause random changes in flight height, in pitch & in roll angles. The article also presents an extended mathematical model of the “flying platform” in the vertical movement mode under external piecewise constant disturbing influences, including disturbance estimation equations, & the upper hierarchy level control algorithms based on the given technological invariants are synthesized. In addition, the integrators’ equations are given; such must be included into the astatic controller & are related to the equations of disturbing influences estimates. In the framework of synergetic control theory, integrators don’t lead to worst stability of a closed-loop system because the method of aggregated controllers’ analytical design guarantees the dynamic system asymptotic stability. Finally, the results of computer simulation of the upper & the lower hierarchy levels’ nonlinear dynamics under disturbed motion with parry of external disturbances by astatic controller integrators are shown, as well as the results of computer simulation of the vehicle’s nonlinear dynamics under disturbed motion without this controller to allow a visual assessment of the controller’s performance by comparison. The relevance of the work consists in the necessity of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft creation to increase the effectiveness of people rescue operations in those disaster areas where helicopters & other modern means don’t cope with a task. The scientific novelty of the work consists in synergetic approach application to the design of the vehicle’s spatial position system equipped with an astatic guaranteeing controller to parry disturbing influences.*

*“Flying platform”; fan in the ring; synergetic control theory; worst disturbance; astatic guaranteeing controller.*

**Введение.** В данной работе рассматривается летательный аппарат, описанный ранее в материалах [1–4] и относящийся к типу «летающая платформа». Этот тип представляет собой вертикально взлетающий аппарат [5], оснащённый подъёмными вентиляторами, которые обычно помещены в аэродинамические кольца, предназначенные для создания дополнительной тяги и для защиты вентиляторов от механических воздействий [6].

Предлагаемая «летающая платформа» содержит фюзеляж в виде аэродинамического крыла малого удлинения, обеспечивающего небольшую подъёмную силу на высоких скоростях (до 150 км/ч) в дополнение к основной тяге вентиляторов. Внутри фюзеляжа расположено четыре электрических двигателя с вентиляторами (два передних и два задних), получающих энергию от турбогенераторной установки. Продольное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары передних и пары задних вентиляторов, а поперечное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары правых и пары левых вентиляторов. Система автоматического управления представляет собой автопилот [7–13] для балансировки пространственного положения аппарата. Эта система основана на принципах синергетической теории, развиваемой на Кафедре синергетики и процессов управления имени профессора А.А. Колесникова Южного федерального университета [14–17].

**Астатические гарантирующие регуляторы.** В работах [3, 4] был выполнен синергетический синтез иерархической [18] системы балансировки пространственного положения «летающей платформы» с применением асимптотического наблюдателя гармонических внешних возмущающих воздействий. Однако метод наблюдения ветровых возмущений не в состоянии предусмотреть всех возможных воздействий, а в процессе синтеза наблюдателя требуются математические модели возмущающих воздействий. Так, для гармонических возмущений требуется информация о частоте колебаний, которую на практике часто бывает затруднительно получить. Уместно отметить, что с течением времени характер и параметры внешних воздействий могут претерпевать значительные изменения. Причина этого заключена в неоднородности воздушной среды и непостоянстве ветрового потока.

Метод наблюдения координат, представленный в работах [3, 4], в принципе, допускает идентификацию внешних воздействий в реальном времени. Однако здесь возникает ряд технических трудностей: динамическая модель объекта управления должна быть очень точной, а быстродействие наблюдателя – существенно превосходить скорость изменения возмущений. Кроме этого, может потребоваться наблюдение всех параметров и координат состояния объекта. В результате законы управления значительно усложняются, и эффективность асимптотического наблюдателя на практике ощутимо падает.

Таким образом, возникает необходимость построения *гарантирующих регуляторов* [19] верхнего уровня иерархии для «летающей платформы». Такие регуляторы с технической точки зрения представляются довольно простыми и реализуют парирование *наихудших внешних возмущений*.

**Наихудшие внешние возмущения.** Определение наихудших воздействий предлагается заимствовать из работы [20]: *«наихудшие – это такие внешние возмущения, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимальное возможное расстояние от желаемого состояния в его фазовом пространстве»*. Из такого определения, в соответствии с принципом максимума Понтрягина, следует математическое описание наихудших возмущений как кусочно-постоянных воздействий вида:

$$M_{\text{sup}} = M_i \text{sign } \mu(t). \quad (1)$$

Изменения величины  $M_i$  и знака функции  $\mu(t)$  в выражении (1) являются случайными.

Гарантирующий регулятор обязан включать в себя *интеграторы*, а получаемые управляющие алгоритмы представляются *астатическими* и на практике легко реализуемыми. Интегральные компоненты, хотя повышают точность управления и подавляют возмущения, тем не менее, ухудшают устойчивость замкнутой системы. Для многосвязных систем с ПИ-элементами в отдельных каналах управления проблема устойчивости встает особенно остро; однако в рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющегося основным методом синергетической теории управления, подобных сложностей нет, поскольку этот подход гарантирует асимптотическую устойчивость динамической системы [14–17].

**Алгоритмы управления верхнего уровня иерархии.** Чтобы провести процедуру парирования кусочно-постоянных ветровых воздействий, требуется дополнить исходную [2] математическую модель аппарата уравнениями *оценок* возмущений, при составлении которых учитывались *технологические инварианты* [2]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{u_1 - mg - C_1 x_1^2 + z_7}{m}, \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2 - C_2 x_2^2 + z_8}{I_x}, \\ \dot{x}_3 &= \frac{u_3 - C_3 x_3^2 + z_9}{I_z}, \\ \dot{x}_4 &= x_1, \\ \dot{x}_5 &= x_2, \\ \dot{x}_6 &= x_3, \\ \dot{z}_7 &= \eta_7 (x_4 - x_4^*), \\ \dot{z}_8 &= \eta_8 (x_5 - x_5^*), \\ \dot{z}_9 &= \eta_9 (x_6 - x_6^*)\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь  $x_1 = V_y$  – вертикальная скорость,  $x_2 = \omega_x$  – угловая скорость относительно продольной оси,  $x_3 = \omega_z$  – угловая скорость относительно поперечной оси,  $x_4 = Y$  – высота,  $x_5 = \mathcal{G}$  – угол тангажа,  $x_6 = \gamma$  – угол крена,  $u_1 = F_y$  – равнодействующая сил двигателей по вертикальной оси,  $u_2 = M_x$  – равнодействующая моментов двигателей по продольной оси,  $u_3 = M_z$  – равнодействующая моментов двигателей по боковой оси,  $m$  – масса аппарата,  $I_x, I_z$  – моменты инерции относительно продольной и поперечной осей,  $g$  – ускорение свободного падения,  $C_1, C_2, C_3$  – аэродинамические коэффициенты сопротивления [5].

В уравнениях (2)  $\eta_7, \eta_8, \eta_9$  – постоянные коэффициенты,  $z_7, z_8, z_9$  – оценки возмущающих воздействий.

Технологическими инвариантами (целями управления) являются [2–4]:

- ◆ стабилизация высоты  $x_4 = x_4^*$ ,
- ◆ стабилизация угла тангажа  $x_5 = x_5^*$ ,
- ◆ стабилизация угла крена  $x_6 = x_6^*$ .

Аналогично статье [4] в соответствии с правилами метода АКАР синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$\begin{aligned} u_1 &= m \left( -\frac{\Psi_1}{T_1} + \dot{\phi}_1 \right) + mg + C_1 x_1^2 - z_7, \\ u_2 &= I_x \left( -\frac{\Psi_2}{T_2} + \dot{\phi}_2 \right) + C_2 x_2^2 - z_8, \\ u_3 &= I_z \left( -\frac{\Psi_3}{T_3} + \dot{\phi}_3 \right) + C_3 x_3^2 - z_9. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих формулах используются следующие величины.

Агрегированные макропеременные  $\Psi_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ :

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= x_1 - \phi_1, \\ \Psi_2 &= x_2 - \phi_2, \\ \Psi_3 &= x_3 - \phi_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Внутренние управления:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -\mu_7 \eta_7 (x_4 - x_4^*) - \frac{\Psi_4}{T_4}, \\ \phi_2 &= -\mu_8 \eta_8 (x_5 - x_5^*) - \frac{\Psi_5}{T_5}, \\ \phi_3 &= -\mu_9 \eta_9 (x_6 - x_6^*) - \frac{\Psi_6}{T_6}. \end{aligned} \quad (5)$$

Производные внутренних управлений:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= -\mu_7 \eta_7 x_1 - \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4}, \\ \dot{\phi}_2 &= -\mu_8 \eta_8 x_2 - \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5}, \\ \dot{\phi}_3 &= -\mu_9 \eta_9 x_3 - \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6}. \end{aligned} \quad (6)$$

Агрегированные макропеременные  $\Psi_i$ ,  $i = \overline{4, 6}$ :

$$\begin{aligned} \Psi_4 &= x_4 - x_4^* + \mu_7 z_7 = 0, \\ \Psi_5 &= x_5 - x_5^* + \mu_8 z_8 = 0, \\ \Psi_6 &= x_6 - x_6^* + \mu_9 z_9 = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Производные агрегированных макропеременных  $\Psi_i$ ,  $i = \overline{4, 6}$ :

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_4 &= \dot{x}_4 + \mu_7 \dot{z}_7 = 0, \\ \dot{\Psi}_5 &= \dot{x}_5 + \mu_8 \dot{z}_8 = 0, \\ \dot{\Psi}_6 &= \dot{x}_6 + \mu_9 \dot{z}_9 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Внутренние переменные регулятора, вычисляемые как интегралы отклонения стабилизируемых переменных от своих желаемых значений:

$$\begin{aligned} z_7 &= \eta_7 \int (x_4 - x_4^*) dt, \\ z_8 &= \eta_8 \int (x_5 - x_5^*) dt, \\ z_9 &= \eta_9 \int (x_6 - x_6^*) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения оценок возмущений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_7 &= -\eta_7 \mu_7 z_7, \\ \dot{z}_8 &= -\eta_8 \mu_8 z_8, \\ \dot{z}_9 &= -\eta_9 \mu_9 z_9. \end{aligned} \quad (10)$$

$\mu_7, \mu_8, \mu_9$  – параметры интеграторов. В установившемся режиме при условиях  $\eta_7 \mu_7 > 0, \eta_8 \mu_8 > 0, \eta_9 \mu_9 > 0$  уравнения (10) являются устойчивыми, что означает выполнение *технологических инвариантов* [2].

Далее законы управления (3) с подстановкой в них равенств (4–10), пройдя через уравнения связи среднего уровня иерархии, поступают в качестве задающих воздействий на нижний уровень иерархии, под влиянием чего система синхронизации электродвигателей «летающей платформы» подстраивается под внешние возмущения для их эффективного парирования, реализуя при этом энергосберегающее управление двигателями аппарата.

**Моделирование динамики разработанной системы.** Графики моделирования поведения «летающей платформы» в условиях внешних возмущений без регулятора показаны ниже на рис. 1–6, а с астатическим гарантирующим регулятором на основе интеграторов (3–10) – на рис. 7–16. В обоих случаях на «летающую платформу» действуют кусочно-постоянные возмущения (например, сильные порывы ветра), меняющиеся через каждые 100 секунд.

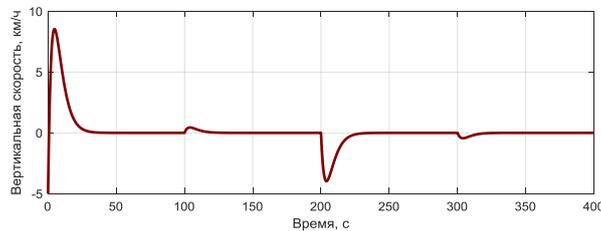


Рис. 1. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

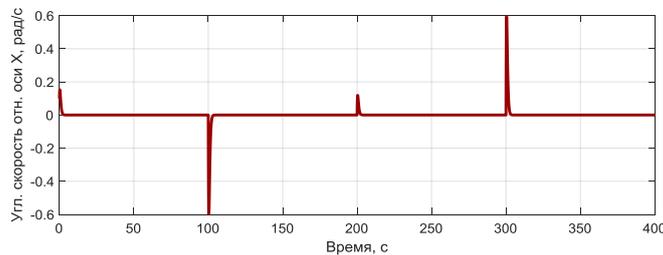


Рис. 2. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

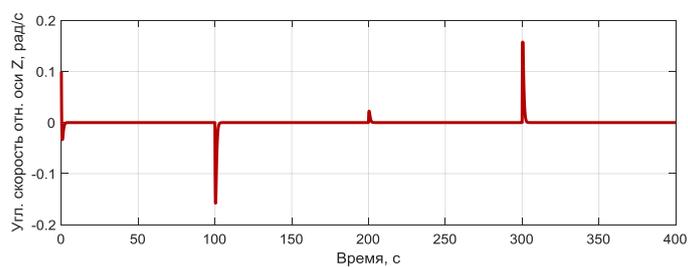


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

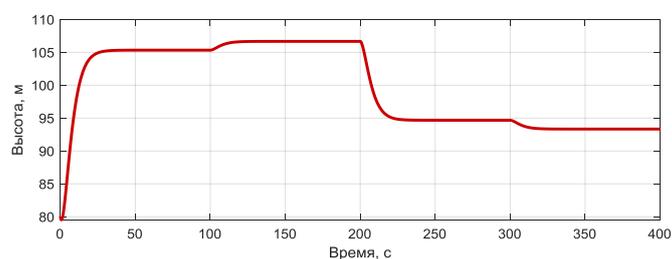


Рис. 4. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

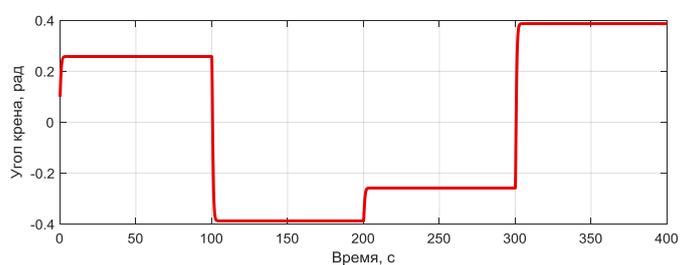


Рис. 5. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

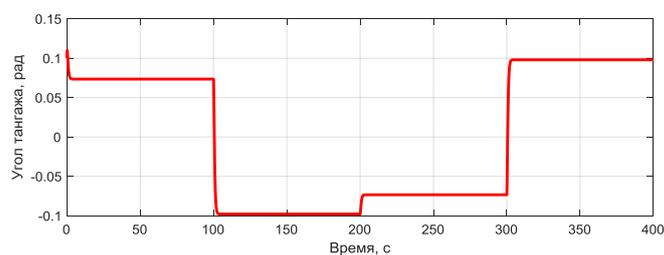


Рис. 6. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

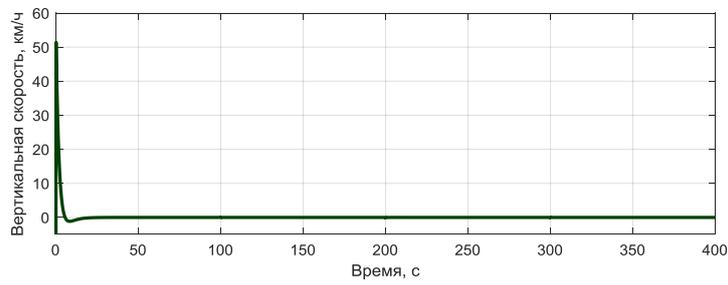


Рис. 7. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

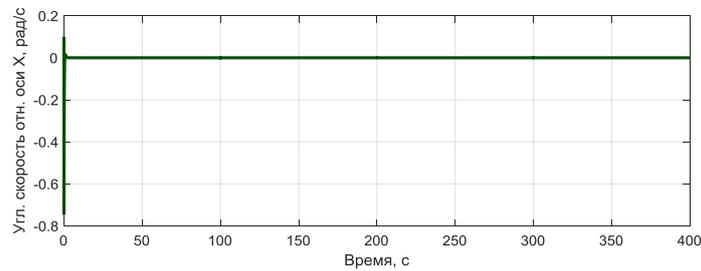


Рис. 8. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

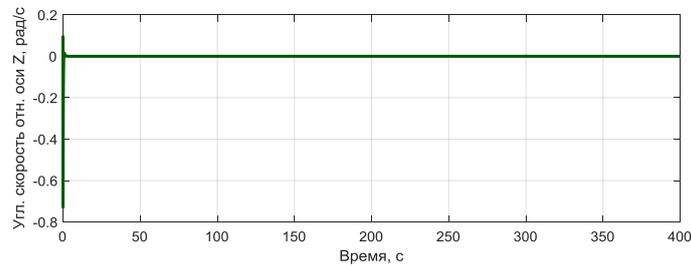


Рис. 9. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

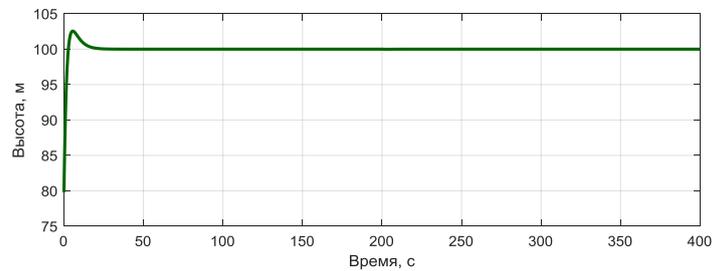


Рис. 10. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

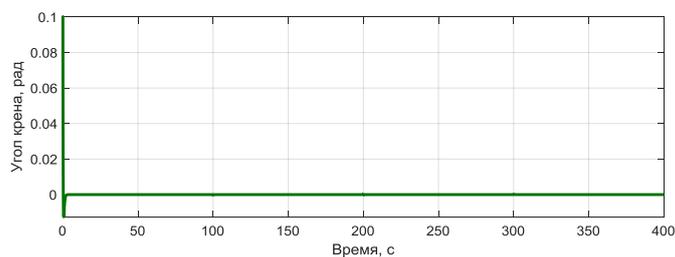


Рис. 11. – График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

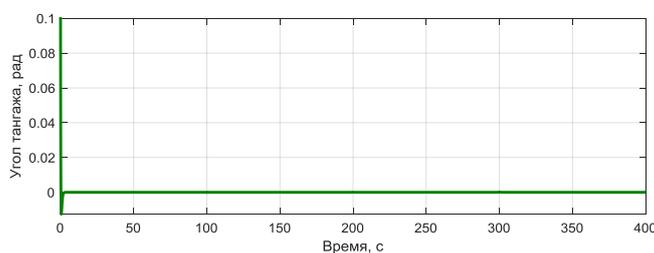


Рис. 12. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

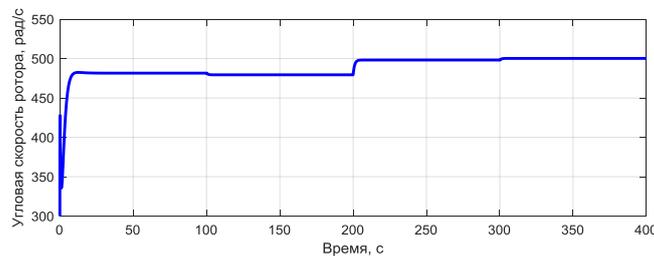


Рис. 13. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

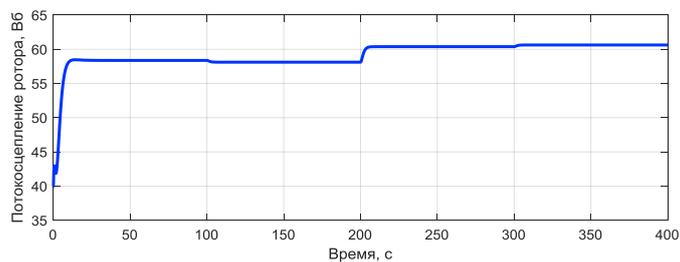


Рис. 14. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

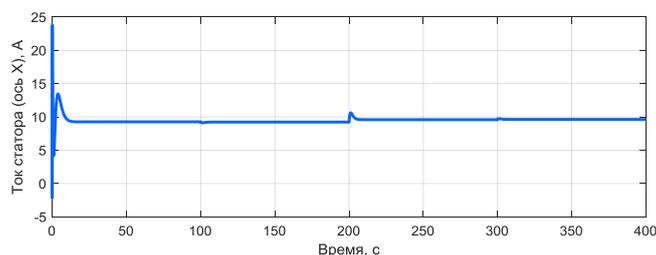


Рис. 15. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

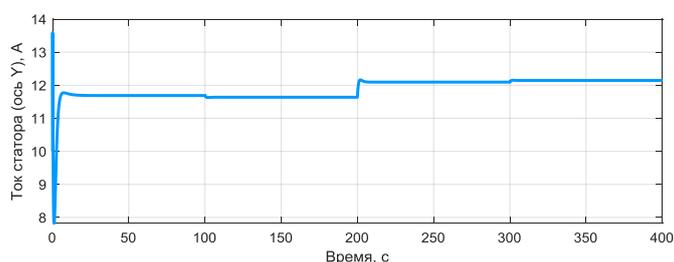


Рис. 16. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

Рис. 13–16 относятся к одному из двигателей; для остальных трёх двигателей графики моделирования аналогичны. Как видно из сравнения рис. 1–6 и рис. 7–12, наилучшие возмущения эффективно парируются интеграторами астатического регулятора.

**Выводы.** В данной работе рассчитан астатический гарантирующий регулятор для «летающей платформы» и проведено компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата в условиях внешних возмущений. Интеграторы астатического регулятора, эффективно парируя возмущения, гарантируют невосприимчивость «летающей платформы» к отрицательному влиянию этих возмущений на траекторию полёта, асимптотическую устойчивость замкнутой системы и соблюдение принципов энергосберегающего управления силовыми установками. Результаты работы будут полезны при разработке новых типов пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, не использующих аэродинамические поверхности для создания подъёмной силы, например, квадрокоптеров, для обеспечения их бесперебойного функционирования в условиях значительных ветровых и прочих воздействий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2348568 / Ю.С. Воронков, О.Ю. Воронков. Лёгкий многорежимный летательный аппарат; Оpubл. 10.03.09. Бюл. № 7.
2. Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы управления «Аэромобилем» в режиме балансировки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 5 (118). – С. 55-60.
3. Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аэромобиля» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 153-161.

4. *Воронков О.Ю.* Синергетический синтез наблюдателя возмущений для системы управления «летающей платформой» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 3 (2020). – С. 29-39.
5. *Курочкин Ф.П.* Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. – М.: Машиностроение, 1970. – 354 с.
6. *Шайдаков В.И.* Аэродинамика винта в кольце. – М.: Изд-во Московского Авиационного Института, 1996. – 88 с.
7. *Буков В.Н.* Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
8. *Lambregts A.A.* Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles // AIAA P1983. № 2239CP.
9. *Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al.* A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer // Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications. Glasgow, Scotland, U.K., 2002.
10. *Tsourdos A., White B.A.* Adaptive flight control design for nonlinear missile // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.
11. *Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach // Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Bologna/Forli, Italy, 2001.
12. *Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation // Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01. St. Petersburg, Russia, 2001.
13. *Farren D., Duc G., Harcaut J.P.* Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.
14. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
15. Современная прикладная теория управления. Ч. I: Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
16. Современная прикладная теория управления. Ч. II: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
17. Современная прикладная теория управления. Ч. III: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
18. *Колесников А.А., Мушенко А.С.* Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
19. *Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П.* Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 240 с.
20. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А.* Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерации электроэнергии. – М., 2009. – 323 с.

## REFERENCES

1. *Voronkov Yu.S., Voronkov O.Yu.* Legkiy mnogorezhimnyy letatel'nyy apparat [Lightweight multi-mode aircraft]. Patent RF No. 2348568; Publ. 10.03.09. Bull. № 7.
2. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез иерархической системы управления «Аеромобилем» в режиме балансировки [Synergetic synthesis of the hierarchical control system "Aeromobil" in the balancing mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 55-60.
3. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аеромобилем» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений [Synergetic synthesis of the hierarchical balancing system of the "Aeromobil" with an asymptotic observer of harmonic disturbances], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 153-161.
4. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез наблюдателя возмущений для системы управления «летающей платформой» [Synergetic synthesis of a perturbation observer for a "flying platform" control system] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (2020), pp. 29-39.

5. *Kurochkin F.P.* Osnovy proektirovaniya samoletov s vertikal'nym vzletom i posadkoy [Fundamentals of designing aircraft with vertical takeoff and landing]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 354 p.
6. *Shaydakov V.I.* Aerodinamika vinta v kol'tse [Aerodynamics of a screw in a ring]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta, 1996, 88 p.
7. *Bukov V.N.* Adaptivnye prognoziryushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
8. *Lambregts A.A.* Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles, *AIAA P1983. № 2239CP*.
9. *Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al.* A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer, *Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications. Glasgow, Scotland, U.K., 2002*.
10. *Tsourdos A., White B.A.* Adaptive flight control design for nonlinear missile, *Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002*.
11. *Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach, *Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Bologna/Forli, Italy, 2001*.
12. *Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation, *Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01. St. Petersburg, Russia, 2001*.
13. *Farren D., Duc G., Harcaut J.P.* Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design, *Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002*.
14. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic management theory]. Taganrog: TRTU, Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
15. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. I: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied control theory. Part I: Optimization approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 400 p.
16. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. II: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied theory of management. Part II: A synergetic approach in the theory of management], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 559 p.
17. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. III: Novye klassy regulyatorov tekhnicheskikh sistem* [Modern applied control theory. Part III: New classes of regulators of technical systems], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 656 p.
18. *Kolesnikov A.A., Mushenko A.S.* Sinergeticheskoe upravlenie protsessami prostranstvennogo dvizheniya letatel'nykh apparatov [Synergetic control of the processes of spatial motion of aircraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2004, No. 2, pp. 38-45.
19. *Abdullaev N.D., Petrov Yu.P.* Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nykh regulyatorov [Theory and methods of designing optimal regulators]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otделение, 1985, 240 p.
20. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuz'menko A.A.* Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generatsii elektroenergii [New technologies for designing modern control systems for electric power generation processes]. Moscow, 2009, 323 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Воронков Олег Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79508449549; кафедра синергетики и процессов управления им. проф. А.А. Колесникова; к.т.н.; доцент.

**Voronkov Oleg Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; Taganrog, Russia, phone: +79508449549; the department of synergetics & control processes n. a. prof. A.A. Kolesnikov; cand. of eng. sc.; associate professor.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.