



№2-2022

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Системы управления и моделирования
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение
- Алгоритмы обработки информации

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

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

Научно-технический и прикладной журнал

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

Подписной индекс 41970

№ 2 (226). 2022 г.

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

Редакционный совет

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

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственные за выпуск: Клевцов С.И., Самойлов А.Н.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 14.06.2022 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 22,8. Уч.-изд. л. – 19,7.

Заказ № 8545. Тираж 250 экз.

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

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

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю.А. Брюхомицкий ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКСТОНЕЗАВИСИМОЙ ГОЛОСОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ	6
В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК.....	14
М.В. Князева, А.В. Боженюк, И.Н. Розенберг МЕТОД И АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО КОНЕЧНОГО АВТОМАТА	21
Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	31
В.С. Мараев АВТОМАТИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ.....	46
А.В. Боженюк, О.В. Косенко, М.В. Князева ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	57
А.А. Иноземцев, Н.Г. Ламанова, А.С. Плешивых, И.Н. Грибков, А.Н. Саженов АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ	65
В.В. Свиридов ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ	78

РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Д.Е. Губарев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей ГЕНЕРАТОР С КОАКСИАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ	89
П.Г. Грицаенко, Л.А. Светличная ЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ СБИС НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С P-N-ПЕРЕХОДАМИ.....	97
А.Н. Зикий, А.С. Кочубей ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО КАЛИБРАТОРА.....	107
С.В. Жилин, В.В. Архипенко, Е.С. Басан, М.Ю. Поленов ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ В РАЗЛИЧНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯХ.....	114
Н.Н. Прокопенко, В.Е. Чумаков, А.В. Бугакова, А.Е. Титов ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С УПРАВЛЯЮЩИМ PN-ПЕРЕХОДОМ.....	126
Д.Л. Газдинский, О.М. Чапура, Л.В. Михнев, Е.А. Бондаренко, Р.В. Пигулев, У.А. Марьяна ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ОКСИДА ЦИНКА ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ.....	136

Р.Н. Набиев, Г.И. Гараев, Р.Р. Рустамов ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЕМКОСТНОЕ УСТРОЙСТВО С ДВУМЯ АВТОГЕНЕРАТОРАМИ	145
Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов ШИРОКОПОЛОСНОЕ ДОУ НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК	154
РАЗДЕЛ III. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	
Э.В. Кулиев, В.А. Семенов, А.В. Котельва, С.В. Игнатъева АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР АЛГОРИТМА ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ	165
Е.С. Подоплелова АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПСИХИАТРИИ	180
В.В. Курейчик, С.И. Родзин, В.В. Бова МЕТОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ	189
А.В. Проскураков СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО И ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ВЕРИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ МЕДИЦИНСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	199
В.В. Золотарев, А.О. Поважнюк, Е.А. Маро МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LIVENESS DETECTION	212
С.Л. Беляков, И.Н. Розенберг, Н.А. Голова, К.С. Яворчук ЗНАНИЯ ДЛЯ АРГУМЕНТАЦИИ ПРИ СОПОСТАВЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ	226
Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян, А.Я. Номерчук ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА	236
Т.А. Крамаренко, Е.В. Фешина, Т.В. Лукьяненко РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ	249

CONTENT

SECTION I. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

Yu.A. Bryuhomitsky AN IMMUNOLOGICAL MODEL OF TEXT-INDEPENDENT VOICE IDENTIFICATION.....	6
V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik METAHEURISTIC OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE STEM CELL BEHAVIOR MODEL.....	14
M.V. Knyazeva, A.V. Bozhenyuk, I.N. Rosenberg METHOD AND ALGORITHM FOR OPERATION PLANNING BASED ON FUZZY FINITE AUTOMATA MODEL.....	21
N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago ASSESSMENT OF INFLUENCING FACTORS AND FORECASTING OF POWER CONSUMPTION IN THE REGIONAL POWER SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT ITS OPERATING MODE.....	32
V.S. Marayev AUTOMATION OF MATHEMATICAL MODELING OF THE INDUCTION SOLDERING TECHNOLOGICAL PROCESS.....	47
A.V. Bozhenyuk, O.V. Kosenko, M.V. Knyazeva OPTOMIZATION OF PROJECT SCHEDULING UNDER UNCERTAIN PARAMETERS.....	57
A.A. Inozemtsev, N.G. Lamanova, A.S. Pleshivkyh, I.N. Gribkov, A.N. Sazhenkov ANALYTICAL REDUNDANCY IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN AIRCRAFT TURBOJET BYPASS ENGINE BASED ON OPTIMAL OBSERVERS.....	66
V.V. Sviridov THE FORMALIZED APPROACH TO SYNTHESIS OF ARCHITECTURE IN THE SYSTEM OF ADAPTIVE GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF THE NONDETERMINISTIC DYNAMIC ENVIRONMENT.....	79

SECTION II. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION

D.E. Gubarev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey GENERATOR WITH COAXIAL RESONATOR.....	89
P.G. Gritsaenko, L.A. Svetlichnaya LOGIC CELL FOR VLSI BASED ON FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH P-N JUNCTIONS.....	98
A.N. Zikiy, A.S. Kochubey EXPERIMENTAL STUDY OF QUARTZ CALIBRATOR.....	107
S.V. Zhilin, V.V. Arkhipenko, E.S. Basan, M.Yu. Polenov IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATION CHANNELS IN VARIOUS WEATHER CONDITIONS.....	114
N.N. Prokopenko, V.E. Chumakov, A.V. Bugakova, A.E. Titov FEATURES OF THE CIRCUITRY OF OPERATIONAL AMPLIFIERS BASED ON COMPLEMENTARY FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH A CONTROL PN-JUNCTION.....	127
D.L. Gazdinsky, O.M. Chapura, L.V. Mihnev, E.A. Bondarenko, R.V. Pigulev, Y.A. Mar'ina STUDY OF THE OPTICAL PROPERTIES OF THIN LAYERS OF ZINC OXIDE ZnO OBTAINED BY THE SOL-GEL METHOD.....	136

R.N. Nabiyev, G.I. Garayev, R.R. Rustamov DIFFERENTIAL-CAPACITORY DEVICE WITH TWO AUTOGENERATORS	145
D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov BROADBAND DOU BASED ON ROTHMAN'S PRINTED LENS FOR MULTIBEAM ANTENNA ARRAYS.....	154
SECTION III. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS	
E.V. Kuliev, V.A. Semenov, A.V. Kotelva, S.V. Ignateva ANALYTICAL REVIEW OF THE DECISION TREE ALGORITHM IN DATA INTELLIGENCE TECHNOLOGY	165
E.S. Podoplelova ANALYSIS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS APPLIED TO SOLVING PSYCHIATRY PROBLEMS	180
V.V. Kureichik, S.I. Rodzin, V.V. Bova DEEP LEARNING METHODS FOR NATURAL LANGUAGE TEXT PROCESSING	190
A.V. Proskuryakov SYNTHESIS OF SOFTWARE AND INFORMATION SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION OF METHODS FOR VERIFICATION OF THE STATE OF MEDICAL BIOLOGICAL OBJECTS FOR A MEDICAL AUTOMATED INFORMATION SYSTEM	200
V.V. Zolotarev, A.O. Povazhnyuk, E.A. Maro METHODS OF IMPROVED USER IDENTIFICATION BASED ON LIVENESS DETECTION TECHNOLOGY	213
S.L. Belyakov, I.N. Rosenberg, N.A. Golova, K.S. Yavorchuk KNOWLEDGE FOR ARGUMENTATION IN COMPARISON OF SPATIAL SITUATIONS	226
E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan, A. Ya. Nomerchuk EVALUATION OF THE STATE OF DYNAMIC WEIGHING BY THE KALMAN FILTER METHOD	236
T.A. Kramarenko, E.V. Feshina, T.V. Lukyanenko DEVELOPMENT OF INTELLIGENT MOBILE APPLICATIONS	249

Раздел I. Системы управления и моделирования

УДК 004.067

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-6-13

Ю.А. Брюхомицкий

ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКСТОНЕЗАВИСИМОЙ ГОЛОСОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ

Предлагается иммунологическая модель клональной селекции с положительным отбором, которая основана на принципах массово-параллельной обработки данных, наблюдаемых в искусственной иммунной системе. Модель предназначена для текстонезависимой идентификации личности по голосу. В отличие от известных парольных систем идентификации голоса, предлагаемая модель реализует децентрализованное распознавание голосовых данных путем их сопоставления с детекторами, моделирующими иммунокомпетентные клетки иммунной системы. Исходные голосовые признаки формируются в линейном предсказателе речи и представляются кепстральными коэффициентами. Последовательность кепстральных коэффициентов расчленяется далее на равные временные участки – морфемы, представляющие собой абстрактные языковые единицы, объединяющие фонемы. Морфемы несут индивидуальную окраску воспроизводимых голосом последовательных временных участков речи, что позволяет продуктивно использовать их в качестве идентификационных признаков голоса. Сопоставление голосовых морфем с детекторами осуществляется по принципу позитивной селекции на основе меры близости Евклида. Принятие моделью идентификационного решения «свой-чужой» реализуется на основе статистического подхода по частоте срабатывания детекторов. Предлагаемая модель реализует идентификацию личности говорящего в темпе поступления его голосовых данных. При этом идентификация личности инвариантна языку, объему и содержанию речи. Преимущество модели – полная защищенность от атак воспроизведения. Эффективная реализация модели, точность и скорость идентификации обусловлены возможностью организации высокоскоростного анализа больших объемов голосовых данных, что в перспективе согласуется с темпами разработки и применения вычислительных систем высокой производительности.

Текстонезависимая голосовая идентификация личности; линейный предсказатель речевого сигнала; кепстральный анализ; искусственные иммунные системы; модель клональной селекции с положительным отбором.

Yu.A. Bryuhomitsky

AN IMMUNOLOGICAL MODEL OF TEXT-INDEPENDENT VOICE IDENTIFICATION

An immunological model of clonal selection with positive selection based on the principles of mass-parallel data processing used in artificial immune systems, is proposed. The model is designed for text-independent identification of a person by voice. In contrast to known password-based voice identification systems, the proposed model implements decentralized recognition of voice data by matching it with detectors that simulate immunocompetent cells of the immune system. The initial voice features are generated in a linear speech predictor and are represented by cepstral coefficients. The sequence of cepstral coefficients is further divided into equal time sections - morphemes, which are abstract linguistic units that unify phonemes. Morphemes carry the individual coloring of consecutive temporal segments of speech reproduced by the voice, allowing

them to be used productively as voice identifiers. The matching of voice morphemes with detectors is carried out according to the principle of positive selection based on the Euclidean proximity measure. The model's "friend-or-foe" identification decision making is implemented on the basis of a statistical approach in terms of the frequency of detector response. The proposed model implements the identification of the speaker's personality at the rate of receipt of his voice data. At the same time, personality identification is invariant to the language, volume and content of speech. The advantage of the model is complete protection against replay attacks. The effective realization of the model, the accuracy and speed of identification are due to the possibility of organizing high-speed analysis of large volumes of voice data, which in the long term corresponds to the pace of development and application of high-performance computing systems.

Text-independent voice identification; linear predictor of speech signal; cepstral analysis; artificial immune systems; clonal selection model with positive selection.

Введение. В широком спектре биометрических систем идентификации личности различной модальности особое место занимает голосовая идентификация. Это обусловлено тем, что голос невозможно украсть, трудно подделать, и главное, процесс идентификации может осуществляться удаленно через системы связи.

Большинство систем идентификации личности по голосу основано на использовании голосового пароля [1–5]. Как следствие, они оказываются уязвимыми для простых атак воспроизведения пароля. Известны также системы текстонезависимой идентификации голоса личности, независимо от состава речи и языка [6, 9], которые исключают возможность атаки воспроизведения пароля.

Постановка задачи. В данной работе текстонезависимую систему голосовой идентификации личности предлагается строить с использованием принципов построения и функционирования искусственных иммунных систем (ИИС) [10–12]. Решение поставленной задачи реализуется путем использования иммунологической модели, в которой реализуется децентрализованная идентификация голоса, основанная на сопоставлении его идентификационных признаков с предварительно созданными детекторами.

Идентификацию личности по голосу в большинстве случаев целесообразно проводить в режиме верификации, когда анализируемые голосовые данные делятся два класса: «свой» или «чужой». Ранее была представлена реализация подобной системы текстонезависимой идентификации с использованием иммунологической модели отрицательного отбора [13, 14]. Однако в этой модели число детекторов, необходимых для идентификации голоса определяется размером области «чужой», которая в большинстве приложений достаточно велика, что сказывается на общей эффективности реализации системы. В большинстве приложений голосовой идентификации область «свой» как правило, существенно меньше области «чужой», что делает целесообразным замену иммунологической модели отрицательного отбора иммунологической моделью клональной селекции (МКС) [15], в которой число детекторов, необходимых для идентификации голоса, определяется размером области «свой».

Как и другие обучаемые модели распознавания образов, предлагаемая МКС содержит две фазы: обучения и распознавания.

Предназначение фазы обучения в МКС состоит в генерации начальной популяции детекторов в метрике голосовых идентификационных признаков с последующим отбором тех из них, которые в пространстве признаков в наибольшей степени соответствуют голосу «своего». Отобранные детекторы подвергаются затем операциям клонирования и гипермутации, что позволяет увеличить популяцию полезных детекторов для распознавания «своего». Итогом фазы обучения является созданная популяция детекторов «своего», которая размещается в памяти МКС.

Предназначение фазы распознавания состоит в сопоставлении предъявляемых голосовых идентификационных признаков с популяцией детекторов иммунной памяти. Установленный при этом уровень близости позволяет принять решения, кому принадлежит анализируемый голос: «своему» или «чужому». Принятие такого решения реализуется на основе статистического подхода, который контролирует частоту выполнения условия критической близости между «своим» и «чужим».

Решение поставленной задачи. На стадии предварительной обработки исходный речевой сигнал подвергается фильтрации на предмет выявления и удаления пауз и шипящих звуков, не обладающих информативностью с точки зрения идентификации его носителя.

Отфильтрованный речевой сигнал $s(n), n = 0, 1, \dots$ с помощью линейного предсказателя речи [16, 17] представляется комбинацией его предыдущих отсчетов:

$$s(n) = - \sum_{i=1}^{N_{LP}} a_{LP}(i) \cdot s(n-i) + e(n),$$

где a_{LP} – коэффициенты линейного предсказания; N_{LP} – число коэффициентов линейного предсказания; $e(n)$ – функция ошибки модели.

Полученные коэффициенты линейного предсказания a_{LP} позволяют вычислить соответствующие им кепстральные коэффициенты [18, 19]

$$C_{LP} = -a_{LP}(i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{j}{i}\right) \cdot a_{LP}(j) \cdot C_{LP}(i-j).$$

При этом число N_C кепстральных коэффициентов C_{LP} выбирается равным числу N_{LP} коэффициентов линейного предсказания a_{LP} .

Для определения принадлежности речевого сигнала $s(n)$ «своему» или «чужому» он разбивается на равные временные участки – морфемы $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^r$, по r отсчетов сигнала в каждом участке. Морфемы представляют собой абстрактные языковые единицы, объединяющие составляющие их фонемы. Для отдельной личности морфемы несут индивидуальную окраску воспроизводимого голосом участков текста, что позволяет продуктивно использовать их в качестве идентификационных признаков голоса.

Каждая морфема может быть представлена r -мерным вектором в Евклидовом признаковом пространстве E^r :

$$\mathbf{s}_i = s_1, s_2, \dots, s_r, \quad i = 1, 2, \dots, r.$$

При этом речевой сигнал $s(n)$ – будет представлен последовательностью векторов признаков \mathbf{s}_i :

$$s(n) \equiv \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots.$$

Число N_{LP} кепстральных коэффициентов C_{LP} определяет размерность голосовых векторов признаков. Диапазон изменения кепстральных коэффициентов $(C_{LP})_{min}$ и $(C_{LP})_{max}$ соответствует рабочему подпространству $E_p^r \subset E^r$, в котором распределены векторы признаков \mathbf{s}_i .

В режиме идентификации голоса последовательность $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$, ограниченная N_s элементами представляет голосовой эталон \mathbf{S} данной личности:

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{N_s} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{N_s}, \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

Последующее решение задачи текстонезависимой голосовой идентификации личности строится с применением аппарата ИИС [10–12].

Обучение ИИС распознавания голоса с использованием МКС осуществляется по следующему алгоритму.

1. На основе случайной генерации с равномерным законом распределения создается первоначальная популяция детекторов $\mathbf{D}_k^\lambda = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{N_d}$, $k = 1, 2, \dots, N_d, \lambda = 0$. При этом детекторы представлены r -мерными векторами в формате векторов признаков $\mathbf{s}_i: \mathbf{d}_i = d_1, d_2, \dots, d_r, i = 1, 2, \dots, r$.

2. Для каждой пары $\mathbf{d}_k \in \mathbf{D}_k^\lambda$ и $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}$ вычисляется степень близости, которая моделирует свойство аффинности (родственности) клеток иммунной системы, представленными антителами и антигенами, и отражает комплементарность их компонентов. Мерой близости (аффинности) a_{kj} является Евклидово расстояние между векторами \mathbf{d}_k и \mathbf{s}_j :

$$a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp} - s_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad N = N_d \cdot N_s.$$

Результат сопоставления всех пар $\mathbf{d}_k \in \mathbf{D}_k^\lambda$ и $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}$ образует матрицу взаимной аффинности \mathbf{A} , содержащая $N = N_d \cdot N_s$ элементов a_{kj} :

$$\mathbf{A} \| a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) \| = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N_s} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N_d 1} & a_{N_d 2} & \dots & a_{N_d N_s} \end{array} \right\|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

3. В столбцах матрицы \mathbf{A} отбирается l из N_d детекторов \mathbf{d}_k , с наибольшей взаимной аффинностью $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$, $k = 1, 2, \dots, l, j = 1, 2, \dots, N_s$ и подвергаются клонированию:

$$C[\mathbf{d}_k] = \mathbf{d}_k^c, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q.$$

Количество образуемых клонов q_k каждого из l детекторов \mathbf{d}_k^c пропорционально степени их взаимной аффинности $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$:

$$q_k \propto k_c \cdot a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j),$$

где k_c – коэффициент пропорциональности при клонировании.

Общее же количество образованных клонов остается равным N_d :

$$\sum_{k=1}^l q_k = \left[\sum_{k=1}^l k_c \cdot a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) \right] = N_d.$$

В результате все детекторы популяции \mathbf{D}_k^λ заменяются их клонами $\mathbf{d}_k^c: \mathbf{D}_k^\lambda \rightarrow \mathbf{D}_k^{\lambda c}$ при выполнении условия

$$k_c = N_d / \sum_{k=1}^l a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j).$$

Операции клонирования детекторов позволяют повысить вероятность покрытия ими всей области распределения биометрических голосовых векторов признаков \mathbf{s}_i

4. Образованные клоны \mathbf{d}_k^c популяции $\mathbf{D}_k^{\lambda c}$ подвергаются операции гипермутации:

$$G[\mathbf{d}_k^c] = \mathbf{d}_k^{cG}, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q.$$

Операция гипермутации сводится к изменению m компонент векторов детекторов \mathbf{d}_k^c на случайные величины в диапазоне $0 < \xi < \delta$. При этом гипермутация G клонов \mathbf{d}_k^c осуществляется обратно пропорционально взаимной аффинности $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$:

$$G \propto k_m / a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j),$$

где k_m – коэффициент гипермутации клонов \mathbf{d}_k^{cG} определяемый из условия: $m = 1$ при $\max_{k=1,2,\dots,l} a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$.

Детекторы \mathbf{d}_k^{CGM} заменяют популяцию $\mathbf{D}_k^{\lambda c}$ на $\mathbf{D}_k^{\lambda CG}$.

Операция гипермутации позволяет сузить область поиска новых эффективных детекторов.

5. Определяется степень взаимной аффинности для каждой пары детектора $\mathbf{d}_k^{CG} \in \mathbf{D}_k^{\lambda CG}$ и морфемы $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}_j$

$$a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp}^{CG} - s_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

Набор степеней взаимной аффинности всех пар $a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j)$ образуют матрицу взаимной аффинности \mathbf{A} , содержащую $N = N_d \cdot N_s$ элементов a_{ij} :

$$\mathbf{A} \| a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j) \|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

6. Из матрицы \mathbf{A} отбираются элементы с наибольшей взаимной аффинностью $a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j)$, $k = 1, 2, \dots, l$, $j = 1, 2, \dots, N_s$, которые образуют популяцию детекторов памяти \mathbf{D}^M .

7. Проверяется условие достижения максимального размера популяции детекторов памяти $\mathbf{D}^M = \mathbf{D}_{\max}^M$. При выполнении этого условия, – переход на шаг 9, иначе следующий шаг.

8. Детекторы $(N_d - l)$ популяции $\mathbf{D}_k^{\lambda CG}$, которые обладают наименьшей аффинностью $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{y}_j)$ заменяются новыми путем генерации новой популяции $\mathbf{D}_k^{\lambda} = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_{N_d}$, $\lambda = \lambda + 1$, $k = 1, 2, \dots, (N_d - l)$, представленных векторами в формате векторов \mathbf{s}_j . Генерация детекторов осуществляется с равномерным законом распределения в соответствующем диапазоне.

9. Останов, конец алгоритма.

Распознавание голоса личности в предлагаемой модели осуществляется путем сопоставления элементов \mathbf{s}_j анализируемой последовательности голосовых признаков \mathbf{S}_j с детекторами \mathbf{d}_k^M памяти \mathbf{D}^M , $k = 1, 2, \dots, N_M$.

Сопоставление реализуется между векторами \mathbf{s}_j и \mathbf{d}_k^M на основе меры близости Евклида:

$$\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) = \sqrt{\sum_{v=1}^p (s_{jv} - d_{kv})^2}.$$

Задается критический уровень близости $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) = \nabla^*$, который, исходя из допустимых ошибок первого рода, определяет границу «свой/чужой». В процессе сопоставления пар \mathbf{s}_j и \mathbf{d}_k^M уровень близости $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$ свидетельствует о том, что элемент \mathbf{s}_j последовательности голосовых признаков \mathbf{S}_j , принадлежит «чужому».

В голосовой биометрии наблюдаются значительные случайные вариации элементов \mathbf{s}_j анализируемой последовательности \mathbf{S}_j голосовых признаков конкретной личности. Кроме того, размеры последовательностей \mathbf{S}_j анализируемых голосовых признаков могут быть достаточно большими. Эти обстоятельства оправдывают применение статистического подхода в решающем правиле принятия решения «свой»-«чужой» [20, 21]. Реализацию такого подхода предлагается путем статистической оценки частоты f выполнения условия $\nabla(\mathbf{y}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$ о принадлежности голосовых признаков \mathbf{S}_j «чужому». Пороговое значение частоты f_{Π} определяет статистическую вероятность принадлежности голоса «своему» или «чужому»:

$$f = f_{\Pi} \approx \hat{F} = n_{\nabla}^+ / n_{\nabla},$$

где n_{∇}^+ число выполнений условия $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$ в n_{∇} операциях сопоставлений.

Принятие текущего идентификационного решения об отнесении анализируемой последовательности голосовых признаков \mathbf{S}_j «своему» или «чужому» осуществляется по правилу:

$$\mathbf{S}_j \equiv \begin{cases} \mathbf{S}_j^c, & \text{если } f \geq f_n; \\ \mathbf{S}_j^a, & \text{если } f < f_n, \end{cases}$$

где \mathbf{S}_j^c – последовательность голосовых признаков «своего»; \mathbf{S}_j^a – последовательность голосовых признаков «чужого».

Заключение. Голосовые системы идентификации, основанные на предъявлении голосового пароля, просты в реализации, но весьма уязвимы атакам воспроизведения пароля. Предлагаемая иммунологическая модель текстонезависимой идентификации личности по голосу лишена этого недостатка. После накопления статистических данных голоса она позволяет в реальном масштабе времени непрерывно идентифицировать личность говорящего в темпе поступления его голосовых данных. При этом модель полностью защищена от атак воспроизведения.

Предложенная иммунологическая модель, реализует свойственные иммунной системе массово-распределенные вычисления и ориентирована на применение вычислительных систем высокой производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al.* A study of interspeaker variability in speaker verification // IEEE Trans. Audio Speech Language Processing. – 2008. – Vol. 16, Issue 5. – P. 980-988.
2. *Zhang Sh.-X., Mak M.-W.* A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification // Speech Communication. – 2009. – Vol. 51. – P. 534-550.
3. *Первушин Е.А.* Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып. 24. – С. 41-54.
4. *Гришин В.М., Калашиников Д.М.* Речевой фрагментатор для нейросетевого биометрического вокодера // Пенза-2012: Тр. научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – <http://пнизи.рф/activity/science/ВПТ/Т8-р73.pdf>.
5. *Lei Y., Hansen J.H.L.* Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification // Speech Communication. – 2011. – Vol. 53. – P. 257-268.
6. *Макаревич О.Б., Бабенко Л.К., Федоров В.М., Юрков П.Ю.* Текстонезависимая аутентификация/идентификация по голосу в системах управления доступом // X Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы». – М.: МИФИ, 2003. – С. 28-29.
7. *Можаров Г.П., Чеботарев Р.С.* Текстонезависимый метод идентификации человека по его голосу // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 11. – С. 168-178.
8. *Клименко Н.С.* Разработка структуры текстонезависимой системы идентификации диктора // Искусственный интеллект. – 2012. – № 4. – С. 161-171.
9. *Bimbot F. et al.* A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2004. – No. 4. – P. 430-451.
10. *Dasgupta D.* Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. *De Castro L.N., Timmis, J.I.* Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000. – 357 p.
12. Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты: пер. с англ. А.А. Романюхи. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
13. *Брюхомицкий Ю.А., Федоров В.М.* Метод текстонезависимой идентификации личности по голосу // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202). – С. 173-181.
14. *Брюхомицкий Ю.А., Федоров В.М.* Иммунологический подход к идентификации личности по голосу // Специальная связь и безопасность информации» (ССБИ – 2019): Матер. III международной научно-практической конференции. Краснодар, 18 февраля 2019 г. – Краснодар: Изд-во: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. – С. 24-30.

15. Брюхомицкий Ю.А. Текстонезависимая идентификация личности по динамическим биометрическим параметрам на основе иммунной модели клональной селекции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (199). – С. 142-151.
16. Маркел Дж., Грэй А.Х. Линейное предсказание речи: пер с англ. / под ред. Ю.Н. Прохорова, В.С. Звездина. – М.: Связь, 1980. – 308 с.
17. Литвинцева А.В., Оболонин М.А. Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9158> (дата обращения: 04.04.2022).
18. Anden J., Mallat S. Multiscale Scattering for Audio Classification // Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2011, Miami, Florida, USA, October 24-28, 2011.
19. Mallat S. Group Invariant Scattering // Communications in Pure and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 65, No. 10.
20. Брюхомицкий Ю.А. Иммунологический метод верификации рукописи с использованием векторного представления данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9 (182). – С. 50-57.
21. Брюхомицкий Ю.А. Иммунологический подход к идентификации личности по динамическим биометрическим параметрам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5 (190). – С. 56-66.

REFERENCES

1. Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al. A study of interspeaker variability in speaker verification, *IEEE Trans. Audio Speech Language Processing*, 2008, Vol. 16, Issue 5, pp. 980-988.
2. Zhang Sh.-X., Mak M.-W. A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification, *Speech Communication*, 2009, Vol. 51, pp. 534-550.
3. Pervushin E.A. Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya diktorov [Overview of the main methods of speaker recognition], *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling], 2011, Issue 24, pp. 41-54.
4. Grishin V.M., Kalashnikov D.M. Rechevoy fragmentator dlya neyrosetevogo biometricheskogo vokodera [Speech fragmentator for neural network biometric vocoder], *Penza-2012: Tr. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Penza-2012: Proceedings of the scientific and technical conference of the cluster of Penza enterprises providing information technology security]. Available at: <http://pniei.rf/activity/science/БИТ/Т8-p73.pdf>.
5. Lei Y., Hansen J.H.L. Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification *Speech Communication*, 2011, Vol. 53, pp. 257-268.
6. Makarevich O.B., Babenko L.K., Fedorov V.M., Yurkov P.Yu. Tekstonezavisimaya autentifikatsiya/identifikatsiya po golosu v sistemakh upravleniya dostupom [Text-independent authentication/voice identification in access control systems], *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy informatsionnoy bezopasnosti v sisteme vysshey shkoly»* [X All-Russian scientific and practical conference "Problems of information security in the higher school system"]. Moscow: MIFI, 2003, pp. 28-29.
7. Mozharov G.P., Chebotarev R.S. Tekstonezavisimyy metod identifikatsii cheloveka po ego golosu [Text-independent method of identifying a person by his voice], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 11, pp. 168-178.
8. Klimenko N.S. Razrabotka struktury tekstonezavisimoy sistemy identifikatsii diktora [Development of the structure of a text-independent speaker identification system], *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial Intelligence], 2012, No. 4, pp. 161-171.
9. Bimbot F. et al. A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, No. 4, pp. 430-451.
10. Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. De Castro L.N., Timmis, J.I. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000, 357 p.
12. Iskusstvennye immunnnye sistemy i ikh primeneniye [Artificial immune systems and their application], ed. by D. Dasgupty: transl. from engl. by A.A. Romanyukhi. Moscow: Fizmatlit, 2006, 344 p.

13. *Bryukhomitskiy Yu.A., Federov V.M.* Metod tekstonezavisimoy identifikatsii lichnosti po golosu [The method of text-independent identification of a person by voice], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202), pp. 173-181.
14. *Bryukhomitskiy Yu.A., Federov V.M.* Immunologicheskiy podkhod k identifikatsii lichnosti po golosu [Immunological approach to voice identification], *Spetsial'naya svyaz' i bezopasnost' informatsii»* (SSBI – 2019): Mater. III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnodar, 18 fevralya 2019 g. [Special communication and information security" (SSBI – 2019): Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Krasnodar, February 18, 2019]. Krasnodar: Izd-vo: Krasnodarskiy TSNTI – filial FGBU «REA» Minenergo Rossii, 2019, pp. 24-30.
15. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Tekstonezavisimaya identifikatsiya lichnosti po dinamicheskim biometricheskim parametram na osnove immunnoy modeli klonal'noy selektsii [Text-independent identification of a person by dynamic biometric parameters based on the immune model of clonal selection], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (199), pp. 142-151.
16. *Markel Dzh., Grey A.Kh.* Lineynoe predskazanie rechi [Linear prediction of speech]: transl. from engl. by, ed. by Yu.N. Prokhorova, V.S. Zvezdina. Moscow: Svyaz', 1980, 308 p.
17. *Litvintseva A.V., Obolonin M.A.* Ispol'zovanie lineynogo predskazatelya rechi v programmnoy modeli nizkoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Using a linear speech predictor in a software model of a low-speed vocoder for speech transmission over a hydroacoustic communication channel], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, No. 3. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9158> (accessed 04 April 2022).
18. *Anden J., Mallat S.* Multiscale Scattering for Audio Classification, *Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2011, Miami, Florida, USA, October 24-28, 2011.*
19. *Mallat S.* Group Invariant Scattering, *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 2012, Vol. 65, No. 10.
20. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskiy metod verifikatsii rukopisi s ispol'zovaniem vektornogo predstavleniya dannykh [Immunological method of manuscript verification using vector representation of data], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 9 (182), pp. 50-57.
21. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskiy podkhod k identifikatsii lichnosti po dinamicheskim biometricheskim parametram [Immunological approach to identity identification by dynamic biometric parameters] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 56-66.

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

Брюхомицкий Юрий Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: bryuhomitskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371905; Кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Bryukhomitsky Yuriy Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: bryuhomitskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371905; the department of information technology security; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик

**МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК***

Рассматриваются методы оптимизации, которые основаны на процессах, происходящих в природе. Такие методы стали все чаще применяться для решения сложных задач. Но у таких методов существуют некоторые недостатки, что стимулирует разработку новых и более совершенных методов оптимизации. Решение NP полных задач требует оптимальных методов, которые будут отвечать всем требованиям проектирования, поэтому существует необходимость в разработке новых и более совершенных методик решения данного класса задач. В качестве такого метода в работе авторами предлагается метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток в естественной среде. Проведенные исследования предлагаемого метода дают решения, которые смогут преодолеть многие недостатки стандартных подходов оптимизации, такие как: попадание в локальный оптимум или низкую скорость сходимости алгоритма на основе рассматриваемого метода. Цель данной работы заключается в разработке метода оптимизации и алгоритма на его основе, для решения сложной целевой функции. Научная новизна заключается в разработке метода оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток для решения NP полных задач. В работе преследуется задача создать условия для оптимального поиска решения сложных функций путем применения, метода поиска и на его основе алгоритма поведения стволовых клеток. Практическая ценность работы заключается в разработке нового метаэвристического метода оптимизации для эффективного решения NP полных задач. Так же в работе проведён сравнительный анализ с известными конкурентами. Главное отличие предложенного метода от других известных методов в применении нового подхода бионспирированного поиска на основе поведения стволовых клеток, которые, как показало практическое сравнение, имеет преимущество над известными аналогами. Итоги практического сравнения методов и алгоритмов на их основе, показали преимущества предложенного в работе подхода на известных тестовых функциях. Проведя анализ проблемы создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения NP полных задач, можно сделать вывод, что в настоящее время разработка подобных подходов является актуальной задачей.

Бионспирированный поиск; графы и гиперграфы; эволюционные вычисления; САПР; проектирование электронных средств; мета-эвристическое моделирование; методы оптимизации; стволовых клеток.

V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik

**METAHEURISTIC OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE STEM CELL
BEHAVIOR MODEL**

The paper discusses optimization methods that are based on processes occurring in nature. Such methods have become increasingly used to solve complex problems. However, such methods have some drawbacks, which stimulates the development of new and more advanced optimization methods. Solving NP complete problems requires optimal methods that will meet all design requirements, so there is a need to develop new and more advanced methods for solving this class of problems. As such a method, the authors propose an optimization method based on a model of the behavior of stem cells in the natural environment. The conducted studies of the proposed method provide solutions that can overcome many of the shortcomings of standard optimization approaches, such as getting into the local optimum or low convergence rate of the algorithm based on the method under consideration. The purpose of this work is to develop an optimization method and an algorithm based on it for solving a complex objective function. The scientific novelty lies in the development of an optimization method based on the stem cell behavior model for solving NP complete problems. The aim of the work is to create conditions for the

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90151.

optimal search for a solution to complex functions by applying the search method and, based on it, an algorithm for the behavior of stem cells. The practical value of the work lies in the development of a new metaheuristic optimization method for the efficient solution of NP complete problems. Also in the work, a comparative analysis with well-known competitors was carried out. The main difference of the proposed method from other known methods is the use of a new approach of bioinspired search based on the behavior of stem cells, which, as shown by practical comparison, has an advantage over known analogues. The results of a practical comparison of methods and algorithms based on them showed the advantages of the approach proposed in the work on known test functions. After analyzing the problem of creating methods, algorithms and software for solving NP complete problems, we can conclude that the development of such approaches is currently an urgent task.

Biospirited search; graphs and hypergraphs; evolutionary computing; CAD; electronic design; meta-heuristic modeling; optimization methods; stem cells.

Введение. Метаэвристические методы в большинстве основаны на естественных механизмах биологических систем или физические механизмы. В качестве примера меланомы биологических систем можно рассматривать генетический алгоритм, оптимизация роя частиц и т.п., а для физических систем представителем является подход имитации отжига. Вероятно, основной причиной выбора и разработки этих подходов является простая реализация и потенциал их развития.

Одним из самых распространённых подходов к оптимизации можно рассматривать методы генетического поиска. Данные методы оптимизации, были предложены Холландом 1975 [1]. Такой подход стал популярным из-за высокого соотношения простоты использования и качества решения. Такой метод имеет случайную основу в поиске, что значит применение его в современных задачах неэффективно без существенных модернизаций. Такие методы берут свое начало в узконаправленных биологических механизмах, чаще всего такие механизмы входят в теорию генетики и мутации. Такие методы проводят оптимизационный поиск наилучшего решения, чем начальный набор альтернативного решения. Одним из основных принципов генетических алгоритмов является их предрасположенность работать в параллельном режиме и способность поиска сверхбольших и сложных областей [2–4].

Для сравнения с предлагаемым методом оптимизации в работе рассматривается еще один известный метод оптимизации роем частиц [5]. Данный подход является популярным в непрерывных и дискретных задачах оптимизации функции. Алгоритм на основе данного метода раскладывается на отдельные частицы, где каждая из них рассматривается как член популяции или агент. Такая популяция способна аккумулировать опыт, полученный от отдельных агентов и от популяции в целом, что дает возможность ускорить условный выход на оптимум. Особенностью такого подхода заключается в увеличении шанса выйти на глобальный оптимум вычисляемой функции в прямой зависимости от количества посторенний [5–7].

Рассмотрим еще один известный метод оптимизации имитации отжига. Основной идеей такого подхода является моделирование процесса минимизации целевой функции в процессе охлаждения материала пока не будет достигнут результат [7–9]. Такой подход основывается на первом полученном решении, которое имеет особую роль и изменяется относительно поставленной задачи.

Далее в работе рассматривается метод оптимизации на основе пчелиной колонии. Такой подход представляет собой моделирование социальных отношений медоносных пчел [11]. Основной тип поведения при оптимизации основан на коллективном поиске источника пищи. Основной отличительной чертой такого метода является интеллект коллективного роя, который характеризуется самоорганизацией и разделением труда. Именно групповое взаимодействие и является ключевым моментом в таком подходе к получению оптимального решения за полиномиальное время.

Автор в данной работе предлагает сравнить разработанный метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток с известными и зарекомендовавшими себя подходами. Для этого в работе будет использована бенчмарка на основе функ-

ции Розенброка, которая достаточно может быть реализована и может дать достаточно сведений чтоб доказать лучшую производительность предлагаемого решения по сравнению с другими. По итогам теста алгоритм на основе предложенного метода оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток показал лучшую скорость сходимости и большую точность в достижении оптимального отклика по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами оптимизации.

Метод основанный на поведении стволовых клеток. Стволовые клетки находятся во всех многоклеточных органах, где они могут стать полноценным органом. Исследования в этой области проводили А. Эрнест, Мак Каллох и Джеймс Э. Тилль [2, 15], и их деятельность была сосредоточена на исследовании эмбриональных стволовых клетках. В своем исследовании они пришли к важному выводу, что стволовые клетки могут вызывать изменения в некоторых органах тела. Проблемы некоторых органов взрослого человека также можно решить, используя способность эмбриональных стволовых клеток делиться и становиться полноценным органом. В работе автор представляет схему оптимизации с использованием двух важных характеристик стволовых клеток в реальном мире, включая их способность к самовоспроизведению. Предлагаемый метод похож на другие алгоритмы оптимизации в том, что он основан на популяции и идее эволюционного процесса, но отличается тем, что использует минимальные ограничения и простую реализацию по сравнению с другими известными методами оптимизации.

Алгоритм основанный на поведении стволовых клеток. Алгоритм стволовых клеток представляется следующим образом: формируется исходная матрица, которая состоит из переменных задачи, а именно присущих свойств стволовых клеток.

$$SC_i = [SC_{i1}, SC_{i2}, \dots, SC_{iD}], i = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

где S представляет собой общее количество ячеек, участвующих в процессе реализации алгоритма, и размер D проблемного пространства.

В предлагаемом алгоритме начальная совокупность выбирается из существующего множества, а затем в последующих итерациях новые клетки добавляются к уже имеющийся совокупности на определенное процентное соотношение. Этот конкретный процент приращения определяется перед реализацией алгоритма. Следовательно, алгоритм начинается с использования только части всех клеток. Стоит отметить, если выбрать большую популяцию на раннем этапе реализации алгоритма оптимизации, это приведет к увеличению необходимым итераций, большим затратам времени и алгоритм может попасть в локальный минимум.

Исходная популяция выбирается так, чтобы ее распределение было равномерным и случайным в рабочем пространстве. Тогда целевая функция для каждой ячейки имеет вид:

$$SC_i = \begin{cases} \frac{1}{a+f_i}, f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i|, f_i < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где a – положительное случайное число в интервале $[0, 1]$, но в большинстве количества случаев $a = 1$. Значение каждой ячейки нормируется как:

$$nSC_n = \max SC_i - SC_n, \quad (3)$$

где SC_n – значение n -ой стволовой клетки, $\max SC_i$ – максимальное значение среди всех стволовых клеток, nSC_n – нормализованное значение n -ой стволовой клетки.

Чем выше значение ячейки – тем слабее сама ячейка, поэтому ее нормализованное значение ниже. Одним из основных параметров при определении наилучшей стволовой клетки (оптимального решения) является относительная эффективность, иными словами способность каждой клетки дифференцировать разные типы клеток, например, клетки костного мозга и клетки крови.

$$P_n = \frac{nSC_n}{\sum_{i=1}^S nSC_i} \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^S nSC_i$ – общее значение стволовых клеток. С другой точки зрения, P_n – относительная сила (еще ее называют выносливость) n -ой стволовой клетки. После определения относительной силы каждой ячейки ее значение сохраняется в памяти каждой ячейки. После каждая из них обменивается своими параметрами, сохраненной в ее памяти, затем полученная информация классифицируется в таблице от самого высокого до самого низкого порядка.

Части ячеек, расположенных в верхнем диапазоне таблицы, дана возможность участвовать в процессе самообновления, и они образуют часть рабочей совокупности в следующей итерации алгоритма. Остальная часть населения выбирается случайным способом из ячеек, не имеющих информации из рабочего пространства. Процесс самообновления осуществляется по принципу:

$$SC_{Optimum}(t + 1) = \xi \cdot SC_{Optimum}(t), \quad (5)$$

где t – представляет каждый цикл (итерацию) и ξ – случайное число в интервале $[0; 1]$.

Для упрощения реализации процесса самообновления, который проходит аналогично и взаимно, значение ξ принимается 0,96 в случае аналогичного самообновления и ξ принимается 0,01 для взаимного самообновления. Так же в некоторых задачах, где размер рабочего пространства велик или задача является NP полной, есть необходимость использовать оба процесса самообновления одновременно, это даст возможность предотвратить единообразие в достижении оптимального решения. При работе с этим алгоритмом в задачах с одним критерием, целью является формирование органа и алгоритм будет выполняться до состояния целого органа. Но когда целью является получение оптимальных значений двух или более критериев, цель состоит в том, чтобы достичь двух или более полных органов, это подтверждает многомерные свойства стволовых клеток.

Экспериментальные результаты. Для оценки предложенного алгоритма на основе моделирования поведения стволовых клеток в естественной среде, проведены сравнительные тесты по основной зависимости числа итераций от значения ЦФ. Для теста использована бенчмарка на основе функции Розенброка. Характеристики функции для теста: 50 запусков, где было использовано множество случайных переменных для инициализации новых наборов альтернативных решений, каждый из которых содержит 5000 итераций, при объеме популяции 100 особей. На рис. 1 показан результат теста.

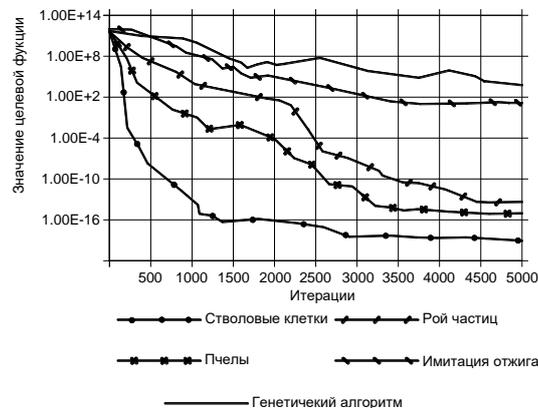


Рис. 1. Результат теста на функции Розенброка

Тест показал, что предложенный алгоритм имеет способность выхода из локального минимума в проблемном пространстве и достигает глобального минимума. Таким образом, есть возможность получить оптимальную производительность, используя предлагаемый алгоритм для оптимизации NP полных и многомерных функций и задач.

Заключение. В работе предложен новый метаэвристический метод и алгоритм на его основе для решения NP полных и многомерных функций и задач. Новый алгоритм основан на том, что стволовые клетки могут вызывать изменения в некоторых органах тела и (или) могут стать полноценным органом. Проведен тест на функции Розенброка и полученные результаты по сравнению с другими оптимизационными алгоритмами. Предложенный алгоритм колонии стволовых клеток имеет более ранний выход в область оптимальных решений, по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами. С учетом параметров заданной популяции и специфики решаемой задачи, алгоритм достигает области оптимальных решений в диапазоне [1000–1500] итераций. Тест показал лучшую производительность предложенного алгоритма, а именно, в конечной точке останова, по критерию количества итераций (5000 итерации), значение целевой функции Розенброка менее 10^{-16} , где аналогичные алгоритмы показывают значение более 10^{-16} . В решении задачи минимизации функции Розенброка, предложенный алгоритм показал наилучшие результаты по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами, что позволяет отметить его потенциал в решении других NP – полных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известие ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 26-34.
2. Данильченко В.И., Данильченко Е.В. Курейчик В.М. Классификация и анализ методов решения задачи размещения СБИС // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2018. – Вып. 1.
3. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design // IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTs 2020. – P. 362-366. – DIO: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
4. Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Структурно-параметрический синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2012. – № 2 (26), Ч. 2. – С. 104-112.
5. Tang, Maolin and Yao, Xin. A memetic algorithm for VLSI floorplanning // IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics. – 2007. – No. 37 (1).
6. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 98-103.
7. Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I. Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns // Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
8. Bockleemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – July 1995. – Vol. MTT-43. – No. 7. – P. 520-523.
9. Голицын Г.А. Петров В.М. Информация и биологические принципы оптимальности: Гармония и алгебра живого. – М.: КомКнига 2005.
10. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб.- метод. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
11. Abraham A., Grosan G., Ramos V. Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007. – 267 p.
12. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Анализ и обзор моделей эволюции // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2007. – № 5. – С. 114-126.

13. Родзин С.И., Курейчик В.В. Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51-79.
14. Об управлении на основе генетического поиска // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 10. – С. 174-187.
15. Бова В.В., Курейчик В.В. Интегрированная подсистема гибридного и комбинированного поиска в задачах проектирования и управления// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 37-42.
16. Гатчин Ю.А., Коробейников А.Г. Методы представления математических моделей в САПР при концептуальном и инфологическом моделировании // IEEE AIS-03, CAD-2003. Интеллектуальные системы, интеллектуальные САПР. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 2. – С. 35-41.
17. Бершадский А.М. Применение графов и гиперграфов для автоматизации конструкторского проектирования РЭА и ЭВА. – Саратов: Изд-во СГУ, 1993.
18. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. – СПб.: Питер, 2000.
19. Акимов О.Е. Дискретная математика: логика, группы, графы, фракталы. – М.: Издатель АКИМОА, 2005.
20. Берштейн Л.С., Боженик А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. – М.: Научный мир, 2005.

REFERENCES

1. Danil'chenko V.I., Kureychik V.M. Geneticheskii algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm of VLSI placement planning], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 26-34.
2. Danil'chenko V.I., Danil'chenko E.V. Kureychik V.M. Klassifikatsiya i analiz metodov resheniya zadachi razmeshcheniya SBIS [Classification and analysis of methods for solving the VLSI placement problem], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer engineering and engineering education], 2018, Issue 1.
3. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design, *IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTS 2020*, pp. 362-366. DOI: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
4. Kalent'ev A.A., Garays D.V., Dobush I.M., Babak L.I. Strukturno-parametricheskii sintez SVCh tranzistornykh usiliteley na osnove geneticheskogo algoritma s ispol'zovaniem modeley monolitnykh elementov [Structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers based on a genetic algorithm using models of monolithic elements], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2012, No. 2 (26), Part 2, pp. 104-112.
5. Tang, Maolin and Yao, Xin. A memetic algorithm for VLSI floorplanning, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics*, 2007, No. 37 (1).
6. Goryainov A.E., Dobush I.M., Babak L.I. Postroenie parametricheskikh modeley passivnykh komponentov SVCh monolitnykh integral'nykh skhem s ispol'zovaniem programmy Extraction-P [Construction of parametric models of passive components of microwave monolithic integrated circuits using the Extraction-P program], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2012, No. 2 (26), pp. 98-103.
7. Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I. Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns, *Int. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines"* (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
8. Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, July 1995, Vol. MTT-43, No. 7, pp. 520-523.
9. Golitsyn G.A. Petrov V.M. Informatsiya i biologicheskie printsipy optimal'nosti: Garmoniya i algebra zhivogo [Information and biological principles of optimality: Harmony and algebra of the living]. Moscow: KomKniga 2005.
10. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: ucheb.- metod, posobie [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems: an educational and methodological guide]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006.

11. *Abraham A., Grosan G., Ramos V.* Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007, 267 p.
12. *Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V.* Analiz i obzor modeley evolyutsii [Analysis and review of evolution models], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2007, No. 5, pp. 114-126.
13. *Rodzin S.I., Kureychik V.V.* Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii (obzor) [Theoretical issues and modern problems of the development of cognitive bioinspired optimization algorithms (review)], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.
14. Ob upravlenii na osnove geneticheskogo poiska [About management based on genetic search], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2001, No. 10, pp. 174-187.
15. *Bova V.V., Kureychik V.V.* Integrirovannaya podsystema gibridnogo i kombinirovannogo poiska v zadachakh proektirovaniya i upravleniya [Integrated subsystem of hybrid and combined search in design and management tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 37-42.
16. *Gatchin Yu.A., Korobeynikov A.G.* Metody predstavleniya matematicheskikh modeley v SAPR pri kontseptual'nom i infologicheskom modelirovanii [Methods of representation of mathematical models in CAD in conceptual and infological modeling], *IEEE AIS-03, CAD-2003. Intellektual'nye sistemy, intellektual'nye SAPR* [IEEE AIS-03, CAD-2003. Intelligent systems, intelligent CAD]. Moscow: Fizmatlit, 2003, Vol. 2, pp. 35-41.
17. *Bershadskiy A.M.* Primeneniye grafov i gipergrafov dlya avtomatizatsii konstruktorskogo proektirovaniya REA i EVA [Application of graphs and hypergraphs for automation of design of REA and EVA]. Saratov: Izd-vo SGU, 1993.
18. *Novikov F.A.* Diskretnaya matematika dlya programmistov [Discrete mathematics for programmers]. Saint Petersburg: Piter, 2000.
19. *Akimov O.E.* Diskretnaya matematika: logika, gruppy, grafy, fraktaly [Discrete mathematics: logic, groups, graphs, fractals]. Moscow: Izdatel' AKIMOА, 2005.
20. *Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V.* Nechetkie grafy i gipergrafy [Fuzzy graphs and hypergraphs]. Moscow: Nauchnyy mir, 2005.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Ю.П. Волощенко.

Данильченко Евгения Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: lipkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525691761; кафедра САПР.

Данильченко Владислав Иванович – e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; тел.: +79526088561; кафедра САПР.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Danilchenko Yevgenia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: lipkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525691761; computer-aided design of department; postgraduate.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; phone: +79526088561; computer-aided design of department; postgraduate.

Kureichik Viktor Mikhailovich – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; phone: +78634311487; computer-aided design of department; dr. of eng. sc.; professor.

М.В. Князева, А.В. Боженюк, И.Н. Розенберг

**МЕТОД И АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО КОНЕЧНОГО АВТОМАТА***

Рассматривается задача планирования, как важная оптимизационная задача, стоящая перед многими транспортными и роботизированными приложениями. Для решения задач планирования подходы основаны на методах оптимизации, методах выборки и дискретизации (sampling-based methods), и обычно такого рода задачи являются NP-трудными и многомерными. В данной статье разработан метод планирования и составления расписаний на основе нечеткой модели конечного автомата. Дано нечеткое графовое представление задачи составления расписания и планирования операций. В работе приведены два подхода к формальной постановке задачи планирования с ограниченными ресурсами и временными переменными: ориентированный на состояния (с переходами между состояниями), ориентированный на темпоральное упорядочивание (на временной шкале). Темпоральное моделирование для задач планирования подразумевает качественный подход к управлению распределением операций или топологическим упорядочиванием, а также количественный подход к обработке неточных длительностей, взаимосвязей между операциями по многочисленным параметрам. Введены понятия нечетких интервалов и нечетких отношений для планирования операций на графе. Разработан алгоритм планирования, основанный на основе теории автоматов и темпоральном моделировании в условиях неопределенности. Используя формализм теории автоматов, проблема планирования и нахождения оптимальных путей решается путем последовательного изменения и анализа состояний планируемой системы с использованием различных операций, пока не будет найдено решение. В работе обсуждается идея упорядоченного во времени частичного расписания, связанного с каждым состоянием планируемой системы. Предложена модель конечного автомата для системы планирования в условиях неопределенности. Разработан метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений. Недетерминированные вычисления для задачи планирования представляют собой дерево решения, корень которого соответствует началу процесса планирования, а каждая точка ветвления в дереве соответствует точке вычисления, в которой у машины есть несколько вариантов выбора.

Автоматическое планирование; нечеткий граф; темпоральное моделирование; нечеткий автомат; операционное планирование.

M.V. Knyazeva, A.V. Bozhenyuk, I.N. Rosenberg

**METHOD AND ALGORITHM FOR OPERATION PLANNING BASED
ON FUZZY FINITE AUTOMATA MODEL**

In this paper the planning and scheduling problem as an important optimization problem in many transportation and robotic applications is discussed. To solve planning problems, the main approaches are based on optimization methods, sampling-based methods, and usually such kinds of problems are NP-hard and high dimensional. In this work, the method for planning and scheduling based on the fuzzy finite state machine model is developed. Fuzzy graph presentation of the scheduling problem and operation planning is given. The paper presents two approaches to the formulation of the planning problem with limited resources and temporal variables: state-oriented (with transitions between states), temporal ordering-oriented (on a time scale). Temporal modeling for planning problems implies a qualitative approach to managing the distribution of operations or topological ordering, as well as a quantitative approach to handling imprecise durations,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00197.

relationships between operations in multiple parameters. The concepts of fuzzy intervals and fuzzy relations are introduced for planning operations on a graph. A planning algorithm based on the theory of automata and temporal modeling under uncertainty has been developed. Using this formalism, a path planning problem is solved by successively altering a state using various operations until a solution is found. The idea of temporal-ordered partial schedule associated with the planning state of the system is discussed. A model of a finite automaton for a planning system under conditions of uncertainty is proposed. A method and algorithm for scheduling operations based on a non-deterministic finite automaton and an enumeration scheme have been developed. The non-deterministic computation for a scheduling problem is a decision tree whose root corresponds to the beginning of the scheduling process, and each branch point in the tree corresponds to a computation point at which the machine has multiple choices. And the finite state machine model (automata) for the planning system under uncertainty is suggested.

Planning and Scheduling; fuzzy graph; temporal modeling; fuzzy finite state machine; operation planning.

Введение. Принятие решений в автоматическом планировании и управлении предполагает решения по поводу действий или операций, которые необходимо спланировать и выполнить для достижения целевых показателей. Этот процесс предполагает обоснование таких решений как: какова последовательность операций и их оценочная продолжительность; как выполнять операции в соответствии со временными ограничениями и ограничениями на используемые ресурсы; какова конечная целевая функция? Кроме того, такая постановка задачи является значимой в заданном оптимизационном контексте и в соответствии с изменениями в среде, вызванными неопределенностью при операционном планировании. Таким образом, различные допущения могут иметь место в связи с непредсказуемой динамикой среды, обзореваемостью событий, нечеткостью переменных в математической модели и, наконец, в том способе описания темпоральных переменных и параллелизме некоторых операций. Неточность в задачах принятия решений предполагает оценку текущего состояния моделируемой системы в течение процесса выполнения. Темпоральный аспект и параллелизм может быть смоделирован с помощью топологического упорядочивания событий или операций с учетом сроков выполнения проекта, отношений предшествования и ресурсного потребления для выполнения операций.

Планирование можно рассматривать как решенную проблему для малоразмерных пространственных задач и простых систем. Существуют различные подходы, и вычислительные алгоритмы для их решения. Проблемы же возникают в многомерных или динамически ограниченных областях, темпоральных задачах. Таким образом, в литературе часто предлагаются различные методы декомпозиции, позволяющие упростить задачу и сначала решить частные ограниченные подзадачи, а затем использовать их решение в качестве руководства для более сложной комплексной задачи.

Ряд работ был посвящен темпоральному обоснованию (изменению среды, событий, выполнению операций), например, качественный подход был представлен в работе Аллена [1–3], логика первого порядка была разработана Drew McDermott [4] и позволяла учитывать события и планы в их причинной связи, изменениях и отношениях между элементами модели. Ряд таких работ положили основу применению машин темпорального вывода или машин временного вывода, которые фиксируют в памяти различные «карты» временных рядов, по одному на дискретный момент времени. Книга по Темпоральному Обоснованию в Искусственном Интеллекте поднимает вопрос временной гранулярности, модального разнообразия темпоральной логики и вычислительной сложности таких задач [5]. Формальная дискуссия по вопросам темпоральных сетей была поднята в работе Ghallab et al. в главе 13 [6] и книге автора Bartak et al. [7]. Автор Dechter и другие соавторы предложили фреймворк, который называется задача удовлетворения

темпоральных ограничений – temporal constraint satisfaction problem (TCSP), в которой переменные представляли собой моменты времени, а темпоральные знания были представлены в виде ограничений или допустимых интервалов; авторы в своей работе также предложили алгоритмы согласованности пути [8].

Представление переменной состояния задачи планирования. В автоматизированном планировании обычно используются некоторые формальные обозначения или область планирования для введения описательной модели. Описательная модель использует формальный аппарат конечного автомата (finite-state machine) и классические допущения сетевого планирования, такие как: требование конечности множеств состояний и операций; дискретная последовательность состояний и операций, подлежащих планированию; определенное предсказание того, в каком состоянии будет система, если действие a будет выполнено в состоянии s . Конечный автомат оперирует состояниями, правилами перехода из одного состояния в другое и зависит от применяемых входных и выходных данных.

Рассмотрим формулировку модели системы переходов состояний и некоторые вычислительные аспекты ее использования для задачи планирования.

Определение 1. Система перехода состояний или область планирования представляет собой 4-кортеж $\Sigma = (S, O, \gamma, \text{cost})$ где:

S – конечное множество состояний системы, или частичные упорядоченные темпоральные планы;

O – конечное множество операций для выполнения;

γ – функция переходов состояний, которое дает следующее состояние или набор возможных состояний системы после того, как действие или операция будет выполнена, $S \times A \rightarrow S$ с $\gamma(s, a)$ является предсказуемым выходом.

Cost – частичная функция стоимости или затрат, $S \times A \rightarrow [0, \infty)$ имеет такую же область определения как и γ . Функция стоимости или затрат может представлять денежные затраты, время или другие ресурсы, которые необходимо минимизировать.

Приведенное выше определение функции переходов состояний было дано для общего случая детерминированного конечного автомата, однако на практике в планировании могут возникать несколько вариантов дальнейших состояний в дискретный момент времени t . Таким образом, каждый уровень ветвления g будет соответствовать точке вычисления, в которой машина имеет несколько вариантов выбора. А функция переходов состояний в недетерминированном конечном автомате будет иметь следующий вид: $\gamma : S \times A \rightarrow \text{Pos}(S)$, таким образом γ возвращает множество состояний. Основной особенностью нечеткого конечного автомата (Fuzzy Finite State Automata - FFSA) является то, что переходы из состояния в состояние вызваны не точными событиями, а нечеткими переменными, таким образом, что сами переходы становятся неточными, неявно заданными. Для системы планирования в любой дискретный момент времени, сама система необязательно находится в одном единственном предопределенном состоянии, а может находиться в нескольких состояниях, каждое из которых ассоциировано с функцией принадлежности (уверенности). Каждое состояние системы S является ассоциированным с нечетким состоянием операции: $\mu_S \in [0, 1]$, которое представляет собой степень нахождения в этом состоянии, то есть, 1 – для всех активных приемлемых состояний, 0 – для всех других неприемлемых состояний. Для зависимых от темпоральных переменных FFSA, переходы состояний могут иметь место в тот момент, когда входные данные изменяются во времени динамически.

Также принято представлять каждое состояние $s \in S$ для системы планирования в виде набора признаков (свойств) и определять набор операторов, которые можно использовать для вычисления переходов между состояниями. Способ оценки каждого состояния и указания членов состояний для множества S состоит в

том, чтобы сформулировать набор ограничений непротиворечивости, поэтому этот набор играет роль ограничений возможных комбинаций присвоений переменных и проверки функции перехода состояний.

Определение 2. Пусть R и X – наборы *отношений* и *переменных состояний* над набором объектов B , а S – пространство состояний переменных состояний над X . Шаблон действия (операторы планирования или схемы действий) для S – это кортеж $a = (head(a); pre(a); eff(a); cost(a))$, где $head(a)$ – это множество синтаксических выражений (операторов планирования); $pre(a) \{p_1, \dots, p_m\}$ – это набор предусловий, $eff(a) \{e_1, \dots, e_n\}$ – множество эффектов от состояния; $cost(a)$ обозначает стоимость или затраты от действия (выполнения операции) [9].

Определение 3. *Планом или частичным расписанием называется* конечная упорядоченная во времени последовательность операций, которая выполняется следующим образом: $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ и общая суммарная стоимость такого плана это: $cost(\pi) = \sum_{i=1}^n cost(o_{it})$.

Определение 4. Упорядоченное во времени частичное расписание для набора операций $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ является применимым для оценки состояния s_0 если существуют такие состояния s_1, s_2, \dots, s_n что: $\gamma(s_{i-1}, o_i) = s_i$ for $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, мы можем определить ряд состояний, связанных с упорядоченными во времени частичными расписаниями, следующим образом:

$$\gamma(s_0, \pi) = s_n; \quad (1)$$

$$\hat{\gamma}(s_0, \pi) = \langle s_0, s_1, \dots, s_n \rangle. \quad (2)$$

В терминах дискретной математики $\hat{\gamma}$ является транзитивным замыканием для γ . Если определенная операция o не применима для состояния s в дискретный момент времени t , тогда $\gamma(s, o)$ не определено. Если операция o применима для состояния s в дискретный момент времени t , тогда:

$$\gamma(s_t, o)(x) = \begin{cases} w, & \text{if } eff(o) \text{ contains an effect } x \leftarrow w, \\ s_t(x), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

где x – это переменная состояния из множества X .

В задачах планирования с ограниченными ресурсами (Resource-Constrained Scheduling Problems – RCSP) подзадача темпорального моделирования обычно предполагает минимизацию темпоральных переменных, ограничений и целевой функции. Операции необходимо планировать и выполнять в течение дискретных периодов времени (или нечетких интервалов) с учетом сроков и ограничений на использование ресурсов. Такого рода цели определяют окончательные решения для частичных или полных темпоральных расписаний, они называются *целевыми состояниями*.

Определение 5. Задача планирования с *переменной состояний* представляет собой тройку $P = (\Sigma, s_0, g)$, где Σ – является областью планирования с переменным состоянием, s_0 – начальное плановое состояние системы, and g – множество целевых показателей для системы.

Любое допустимое решение, частичный темпоральный план (partial temporal-scheduled plan) должен удовлетворять следующему условию: решением для P является любой план выполнения операций, которые должны быть расположены на временной шкале $\pi = \langle o_{1t}, o_{2t}, \dots, o_{nt} \rangle$ таким образом, что: состояние $\gamma(s_0, \pi) = s_n$ должно удовлетворять цели g и $\gamma(s_0, \pi) \in S_g$, где S_g – множество целевых состояний планируемой системы. Любое такое решение может быть минимальным по количеству операций, кратчайшим по времени или оптимальным по стоимости. Выполнение операций также может иметь перекрытия во времени, если их условия, режимы выполнения и ресурс-эффекты независимы. Цели, как правило, ограничены сроками и стоимостью проекта.

Темпоральное моделирование для задач планирования подразумевает качественный подход к управлению распределением операций или топологическим упорядочением, а также количественный подход к обработке неточных длительностей, взаимосвязей между операциями по многочисленным параметрам. Формальная постановка задачи с временными переменными для задачи планирования с ограниченными ресурсами может быть как *ориентированной на состояния* (с переходами между состояниями), так и *ориентированной на темпоральное упорядочивание* (на временной шкале).

В следующем разделе обсуждается ориентированный на время метод моделирования, который использует интервалы в качестве временных примитивов и учитывает как качественные, так и количественные отношения между операциями в дискретные моменты времени.

Темпорально-ориентированное представление задачи планирования. Нечеткие интервалы и нечеткие отношения. Рассмотрим количественную дискретную модель, описываемую набором темпоральных переменных, например, t_1, t_2, \dots, t_n и каждая переменная обозначает момент времени. Интервальная переменная характеризуется парой $[t_1, t_2]$ такой что: $t_1 < t_2$ и их длительности являются положительными числами.

Определение 6. *Нечеткий интервал* $\tilde{I}(\cdot)$ и функция принадлежности $\mu_I(\cdot)$ представляет собой нечеткое подмножество, если выполняются следующие условия: $\forall(x, y, z) \in \mathfrak{R}, z \in [x, y]$, и $\mu_I(z) \geq \min(\mu_I(x), \mu_I(y))$ [10, 11]. Таким образом, нечеткий интервал в задаче планирования – это нечеткое множество на временном интервале, чьи лево- и правосторонние (L-R) α -срезы являются интервалами, и каждая переменная состояния $x(t)$ – это функция на временном интервале.

Нечеткий интервал может быть так же определен с помощью упорядоченной пары L-R интервалов $(\tilde{l}^-, \tilde{r}^+)$, где \tilde{l}^- является нечеткой нижней границей и \tilde{r}^+ называется нечеткой верхней границей, а $A_{\tilde{M}}$ является функцией присваивания [12]. С темпоральной точки зрения переменная состояния x может быть охарактеризована своим постоянством (*persistence*) или изменением (*change*) в рамках нечеткого временного утверждения.

Постоянство на интервале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x = v$ обозначает, что $x(\tilde{t}) = v$ для каждого момента \tilde{t} в темпоральном интервале $\tilde{t}_1 \leq \tilde{t} \leq \tilde{t}_2$.

Изменение на интервале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x: (v_1, v_2)$ показывает, что значение переменной состояния x изменяется на нечетком интервале $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]$ следующим образом: от $x(\tilde{t}_1) = v_1$ до $x(\tilde{t}_2) = v_2$ с $v_1 \neq v_2$.

Рис. 1 иллюстрирует временную шкалу для постоянства переменной состояния x , где интервал соответствует $[\tilde{t}_2, \tilde{t}_3]$.

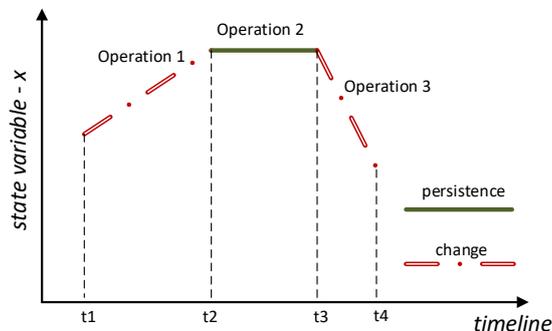


Рис. 1. Временная шкала для переменной состояния x в задаче планирования

Например, утверждение $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]x$: (*operation 1*) иллюстрирует, что для переменной состояния x профиль ресурсов, необходимый для выполнения операции 1, может меняться со временем. Точные четкие моменты этого изменения не зафиксированы на графике, но на рис. 1 видно, что значения переменной состояния x для операции 1 и интервала времени $[\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]$ изменяются и могут быть инициализированы на моменте исполнения самой операции. Этот вид неопределенности также может быть устранен с помощью нечетких интервалов. Временные утверждения на временной шкале и их экземпляры имеют смысл в соответствующих областях планирования и отражают возможную эволюцию переменной состояния x .

Определение 7. *Интервальное упорядочение* ряда нечетких временных интервалов $[\tilde{t}_i, \tilde{t}_j]$ на временной шкале - это частичный порядок (график) или последовательность упорядоченных во времени интервалов выполнения операций, которые должны быть запланированы с учетом отношений предшествования, функции стоимости и отношений «окончание-начало».

Определение 8. *Нечеткое отношение* \tilde{R} это отображение из декартова пространства $X_1 \times X_2$ на интервал $[0,1]$, где сила такого отображения выражается с помощью функции принадлежности отношения $\mu(x, y)$. Нечеткое темпоральное отношение показывает степень наличия или отсутствия связи между элементами двух или более нечетких интервальных множеств.

Наиболее традиционным четким методом формализации качественных отношений между интервалами, зависящими от времени, является интервальная алгебра Аллена: Allen's Interval Algebra, or Interval Algebra (IA) [2]. Аллен ввел 13 зависящих от времени отношений между четкими интервалами от начала до конца, которые можно применять при планировании отношений предшествования между операциями следующим образом: до, после, встречается (встречается), перекрывает (перекрывается), в течение (включает), начинает (начинается), заканчивает (заканчивается) и равно [12].

Рассмотрим следующий пример. Пусть даны два множества: $X_1 = \{o_1, o_2, \dots, o_5\}$ четкие операции и $\tilde{X}_2 = \{\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_5\}$ нечеткие временные длительности операций (интервалы), и соответствующие отношения $R(X_1, \tilde{X}_2) = \{(o_1, \tilde{d}_2), (o_3, \tilde{d}_4), (o_4, \tilde{d}_1), (o_5, \tilde{d}_3)\}$ между ними. Такой тип отношений является бинарным и состоит из упорядоченных пар (o_i, \tilde{d}_j) ; и соответствующих функций принадлежности $\mu_R(o_i, \tilde{d}_j)$, такой тип нечетких отношений может быть представлен в трехмерном пространстве (рис. 2).

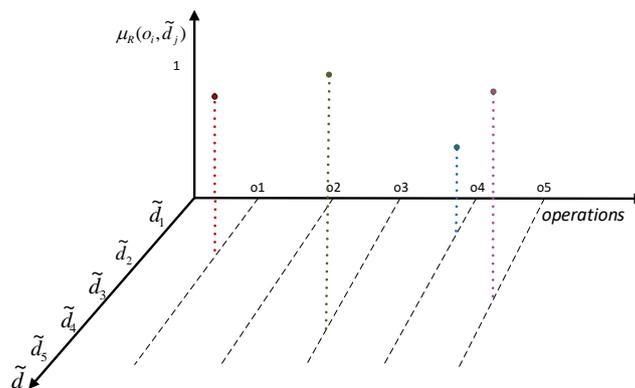


Рис. 2. Трехмерное представление нечетких отношений между операциями и их длительностью выполнения

Нечеткое n -арное отношение \tilde{R} , определенное на области $X = X_1 \times \dots \times X_n$, это упорядоченный набор кортежей из n -элементов следующим образом:

$$\tilde{R} = \{((x_1, \dots, x_n), \mu_R(x_1, \dots, x_n)) | (x_1, \dots, x_n) \in X\}, \quad (4)$$

где $\mu_R(x_1, \dots, x_n): X_1 \times \dots \times X_n \rightarrow [0,1]$ это функции принадлежности над отношением R , которые отображают домен на непрерывный интервал $[0,1]$.

Проблема упорядочения интервалов при составлении расписаний и планировании может рассматриваться как частный случай задачи геометрии интервальных расстояний (*interval distance geometry problem – iDGP*), где расстояния не заданы точно. Основная проблема геометрии расстояний, как задачи принятия решений, состоит в оценке измерений попарных расстояний между элементами в некотором множестве и вычислении координат этих точек.

В следующем разделе обсуждается нечеткое графовое интервальное представление задачи планирования и системы переходов состояний, которое позволяет оценить текущий этап планирования и частичный план на его операционном этапе выполнения.

Представление нечеткого графа для задачи планирования с интервальными значениями переменных. Рассмотрим связанный нечеткий граф $G = (V, E, \tilde{d})$, где $\tilde{d}: E \rightarrow \mathbb{R}_+$ это нечеткие положительные веса на ребрах и целью является цель состоит в том, чтобы найти вложение вершин V в евклидово пространство $V \rightarrow \mathbb{R}^K$, таким образом, что: для каждого ребра $\{u, v\}$ следующее выражение истинно:

$$\forall \{u, v\} \in E \quad \|x_u - x_v\| = \tilde{d}_{uv}. \quad (5)$$

В задачах планирования и составления расписаний продолжительность операций обычно определена неточно из-за характера процесса планирования, а интервально представленная задача может быть выражена следующим образом. Для данного положительного целого числа K и интервально-взвешенного нечеткого графа $G = (V, E, \tilde{d})$, где нечеткие длительности ассоциированы с ребрами $\{u, v\} \in E$ и положительными интервальными весами $[d(\{u, v\}), \bar{d}(\{u, v\})]$, задача геометрии расстояний - это задача построения графа G , отображающего $x: V \rightarrow \mathbb{R}^K$ и удовлетворяющего интервальным расстояниям и отношениям предшествования:

$$d(\{u, v\}) \leq \|x_u - x_v\| \leq \bar{d}(\{u, v\}), \quad \forall \{u, v\} \in E, \quad (6)$$

где $\|\cdot\|$ обозначает Евклидову норму.

Каждый дискретный момент связан с частичным расписанием (количеством выполняемых операций) и соответствует определенному состоянию S^t планируемой системы, рис. 3.

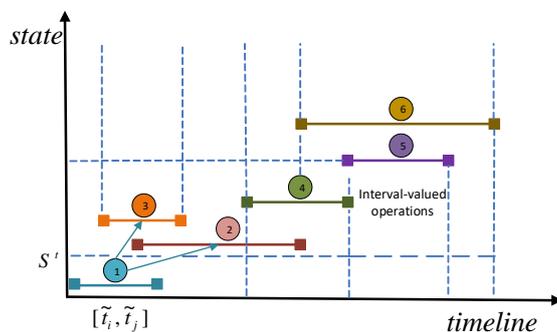


Рис. 3. Интервальное представление нечетких отношений предшествования между операциями, длительностью и состояниями системы планирования

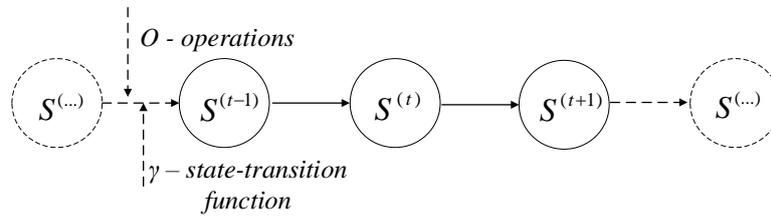


Рис. 4. Схема планирования, ориентированная на переходы состояний

Рис. 4 иллюстрирует схему, ориентированную как на состояния (с переходами между состояниями), так и на темпоральное упорядочивание (на временной шкале), где каждый узел представляет собой состояние в каждый момент времени t и операции, которые необходимо выполнить, чтобы система перешла в следующее состояние в $t+1$ момент [13, 14]. Функция перехода γ представляет следующее состояние, или набор возможных состояний, после того, как операция (или набор операций) будет выполнена.

Метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений. Недетерминированные вычисления в конечном автомате [15] для задачи упорядочивания операций представляют собой *дерево предшествования*, корень которого соответствует началу процесса планирования, а каждая *точка ветвления* в дереве соответствует *точке вычисления*, в которой у машины есть несколько вариантов выбора. Идея использовать схему перечислений была впервые предложена и применена к задачам планирования для подсчета перестановок с запрещенными шаблонами (permutations with forbidden patterns) [16]. Подход, основанный на схеме перечисления в планировании, можно определить как полное, упорядоченное перечисление всех операций (наборов операций) и их топологическое упорядочивание.

В данной работе разработанный алгоритм основывается на построении частичных расписаний выполнения операций и построении *дерева предшествования*, в литературе – *backtracking algorithm* [17]. Каждое состояние S дерева предшествования ассоциировано с точкой вычисления t_s , процедура начинается с выполнения первой фиктивной стартовой операции в момент времени 0 и на каждом шаге мы определяем: множество текущих завершенных операций FOP_{st} ; множество приемлемых для планирования операций EOP_{st} для выполнения в каждый момент времени $t+1$, то есть, тех операций, чьи предшественники уже были выполнены согласно отношениями предшествования; множество операций, которые находятся в процессе выполнения OIP_{st} в момент времени t .

После старта, текущее частичное расписание оценивается и расширяется путем добавления для выполнения операций из подмножества *приемлемых операций* (или так называемое, подмножество расширенных альтернатив EA_{st} с учетом требований к ресурсам) в точке вычисления.

Введем следующие обозначения для построения алгоритма:

S_t – текущее состояние системы, ассоциированное с частичным расписанием в момент времени t ;

$SofMO_s$ – множество способов выполнения работы в зависимости от требуемого уровня ресурсов для определенного s -состояния (в литературе multi-mode execution [18–20]); $\tilde{s}_{is}(\cdot)$, $\tilde{c}_{is}(\cdot)$ – начальные и конечные интервальные значения для выполнения операции i , где $\tilde{c}_i(\cdot) = \tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_i(\cdot)$; $\tilde{d}_i(\cdot)$ – нечеткая длительность выполнения операции i .

Для каждого текущего состояния s мы определяем новую точку вычисления t и определяем множество приемлемых операций. Затем определяем способы выполнения приемлемых операций $SofMO_s$, и после выбора способа выполнения для каждой операции MO_s , вычисляем EA_{st} .

Step 1: Initialization.

Set $s:=0$; dummy source operation $i_1=0$; $\tilde{t}_0:=0$; $\tilde{s}_0=0$; $OIP_{st}:=\{0\}$; $FOP_{st} = \emptyset$; $m_0:=1$; $EOP_{st} := \emptyset$.

Step 2: Compute new decision point state and eligible operations.

Increase state $s=s+1$; $\tilde{t}_s := \min \{\tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_i(\cdot) | i \in OIP_{s-1,t}\}$;
 $FOP_{st} := FOP_{s-1,t} \cup \{i \in OIP_{s-1,t} | \tilde{s}_i(\cdot) + \tilde{d}_{im}(\cdot) = \tilde{t}_s\}$;
 $EOP_{st} := \{i \in \{1, \dots, i+1\} \setminus (FOP_{st} \cup OIP_{s-1,t}) | \rho \subseteq FOP_{st}\}$;
 $OIP_{st} := OIP_{s-1,t} \setminus FOP_{st}$;
 if $i+1 \in EOP_{st}$, then store current solution and go to step 7.

Step 3: Compute mode alternatives.

If $EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t} = \emptyset$, then $SofMO_s := \emptyset$ and go to step 5,
 else $SofMO_s := SetofModeAlternative(EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t})$.

Step 4: Select next mode alternative.

if no untested mode alternative is left in $SofMO_s$
 then go to step 7,
 else select untested $MO_s \in SofMO_s$;
 for each $i \in EOP_{st} \setminus EOP_{s-1,t}$ update $m_i := MO_s(i)$;
 if a non-renewable resource conflict occurs,
 then go to step 4.

Step 5: Compute extension alternative.

$EA_{st} := SetofExtensionAlternatives(EOP_{st}, OIP_{st})$.

Step 6: Select next extension alternative.

if no untested extension alternative is left in EA_{st} ,
 then go to step 4,
 else select untested alternative in EA_{st} , $OIP_{st} := OIP_{st} \cup EA_{st}$;

for each $i \in EA_{st}$ update $\tilde{s}_i(\cdot) := \tilde{t}_s$; go to step 2.

Step 7: Backtracking.

$s:=s-1$; if $s=0$ then *STOP*, else $OIP_{st} := OIP_{st} \setminus EA_{st}$;
 go to step 6.

Имея дискретную последовательность состояний, временные ограничения, отношения предшествования между операциями, задача планирования может быть решена с помощью алгоритма планирования для s -состояний. Для каждого состояния схемы перечисления этот алгоритм оценивает все возможные частичные расписания и сохраняет текущее решение до тех пор, пока не будут запланированы все операции.

Заключение. В статье предложена описательная модель, ориентированная на состояние планируемой системы и темпоральные переменные для обработки ограничений и неопределенности для задачи автоматического планирования и составления расписаний. Основная идея статьи состоит в том, чтобы показать, как темпоральный контекст и модель конечного автомата могут быть применены к системе планирования в рамках качественного и количественного подходов. В статье представлены нечеткое графовое интервальное представление задачи планирования, система переходов состояний, а так же метод и алгоритм планирования операций на основе недетерминированного конечного автомата и схемы перечислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Allen J., Kautz H., Pelavin R., and Tenenber J. Reasoning about Plans. Morgan Kaufmann, 2014.
2. Allen J.F. Maintaining knowledge about temporal intervals, *Communications of the ACM*. – 1983. – Vol. 21 (11). – P. 832-843.
3. Allen J. Planning as temporal reasoning, *In Proc. Intl. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR). San Mateo: Morgan Kaufmann, 1991*, pp. 3-14,
4. McDermott D. A temporal logic for reasoning about processes and plans, *Cognitive Science*, 1982, Vol. 6, pp. 101-155.
5. Fisher M., Gabbay Dov M., and Vila L. Handbook of Temporal Reasoning in Artificial Intelligence, Vol. 1, Elsevier, 2005.
6. Ghallab M., Nau D.S., and Traverso P. Automated Planning: Theory and Practice. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, Amsterdam, 2004.
7. Bartak R., Morris R., and Venable B. An Introduction to Constraint-Based Temporal Reasoning. Morgan&Claypool, 2014.
8. Dechter R., Meiri I., and Pearl J. Temporal constraint networks, *Artificial Intelligence*, 1991, Vol. 49, pp. 61-95.
9. Ghallab M., Nau D., Traverso P. Automated Planning and Acting. Cambridge University Press, 2016.
10. Fortin J., Dubois D., Fargier H. Gradual Numbers and Their Application to Fuzzy Interval Analysis, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, Vol. 16 (2), pp. 388-402.
11. Dubois D., Kerre E., Mesiar R., Prade H. Fuzzy Interval Analysis, In: Dubois D., Prade H., Eds., *Fundamentals of Fuzzy Sets*, pp. 483-581, The Handbooks of Fuzzy Sets Series, Vol. 7. Springer, 2000
12. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U. Fuzzy Temporal Graphs and Sequence Modelling in Scheduling Problem, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1239, pp. 539-550.
13. Kacprzyk J., Knyazeva M., Bozhenyuk A. Fuzzy Interval-Valued Temporal Automated Planning and Scheduling Problem, *Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, 2021, Vol. 362, pp. 51-58.
14. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Bozheniuk V. Unfolding Fuzzy Temporal Computational Graph for Project Scheduling Problem, *Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, 2021, Vol.307, pp. 615-622.
15. Sipser M. Introduction to the Theory of Computation. Cengage Learning, 2012.
16. Zeilberger D. Enumeration Schemes and, more importantly, their automatic generation, *Annals of Combinatorics*, 1998, 2, pp. 185-195.
17. Patterson J.H., Talbot F.B., Slowinski R., Weglarz J. Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems, *European Journal of Operational Research*, 1990, Vol. 49, Issue 1, pp. 68-79.
18. Hartmann S. Project Scheduling under Limited Resources, Models, Methods, and Applications, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 1999, Vol. 478.
19. Cheng J., Fowler J., Kempf K., Mason S. Multi-mode resource-constrained project scheduling problems with non-preemptive activity splitting, *Computers & Operations Research*, 2015, Vol. 53, pp. 275-287.
20. Reyck B.D., Herroelen W. The multi-mode resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations, *European Journal of Operational Research*, 1999, Vol. 119, pp. 538-556.

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

Князева Маргарита Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: mknayazeva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371743; к.т.н.; доцент.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; д.т.н.; профессор.

Розенберг Игорь Наумович – Научно-исследовательский институт автоматизации, информатизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»); e-mail: avb@itt.net.ru; г. Москва, Россия; научный руководитель АО «НИИАС»; д.т.н.; профессор.

Knyazeva Margarita Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371743; cand. of eng. sc.; associate professor.

Bozhenyuk Aleksander Vitalievich – e-mail: avb002@yandex.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Rozenberg Igor Naumovich – Public corporation “Research and development institute of railway engineers”; e-mail: avb@itt.net.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-31-46

Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Статья посвящена исследованиям вопросов оценки воздействующих факторов и прогнозирования электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режимов ее эксплуатации. Проведен анализ существующих методов прогнозирования энергопотребления. Обоснован выбор метода прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети. Рассмотрен алгоритм создания нейросети для краткосрочного прогноза электрической нагрузки. Актуальность работы обусловлена требованиями действующего законодательства к прогнозированию электропотребления для решения задачи поддержания баланса мощностей между генерирующей стороной и потреблением электрической энергии. При этом одной из основных задач, связанных с генерацией электрической энергии и ее потреблением, является задача поддержания баланса мощностей. С одной стороны, при увеличении плановой нагрузки могут возникнуть перебои в поставке электроэнергии, с другой стороны, уменьшение электропотребления приведет так же к уменьшению КПД электростанций, и в конечном счете – к повышению стоимости на электроэнергию как для субъекта оптового рынка электроэнергии, так и для конечного потребителя. Разработанная нейросетевая модель (НС) модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных (активная и реактивная мощность, температура окружающей среды, дата и индекс дня). Полученная НС модель краткосрочного прогнозирования электропотребления участка районной электрической сети 10 кВ, учитывает факторы: – времени, – метеорологических условий, – отключений отдельных питающих линий электропередач, – режима работы потребителей электроэнергии. Получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии наружной температуры, типу дня и т.д. Модель прогнозирования величины, потребляемой активной и реактивной мощности вполне работоспособна, однако на данном этапе все еще имеет довольно высокий уровень погрешности прогнозирования. Для повышения точности прогнозирования необходимо увеличить базу данных, составляющих обучающую выборку, т.к. на данный момент имеющиеся данные охватывают временной промежуток длиной лишь 3–4 месяца. Результаты анализа показали, что наибольшие трудности вызывает прогнозирование потребления реактивной мощности.

Анализ данных; искусственные нейронные сети; прогнозирование электропотребления; набор факторов; надежность систем энергоснабжения; методы прогноза; архитектура нейронной сети.

N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago

ASSESSMENT OF INFLUENCING FACTORS AND FORECASTING OF POWER CONSUMPTION IN THE REGIONAL POWER SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT ITS OPERATING MODE

The article is devoted to the research of the assessment of influencing factors and forecasting of power consumption in the regional power system, taking into account its operating modes. The analysis of existing methods of forecasting energy consumption is carried out. The choice of a forecasting method using an artificial neural network is justified. An algorithm for creating a neural network for short-term prediction of electrical load is considered. The relevance of the work is due to the requirements of the current legislation for forecasting electricity consumption in order to solve the problem of maintaining a balance of power between the generating side and the consumption of electric energy. At the same time, one of the main tasks related to the generation of electric energy and its consumption is the task of maintaining a balance of capacities. On the one hand, with an increase in the planned load, interruptions in the supply of electricity may occur, on the other hand, a decrease in electricity consumption will also lead to a decrease in the efficiency of power plants, and ultimately to an increase in the cost of electricity both for the wholesale electricity market and for the end user. The developed neural network model reduces the task of short-term forecasting of power consumption to the search for a matrix of free coefficients by training on available statistical data (active and re-active power, ambient temperature, date and index of the day). The received NS model of short-term forecasting of power consumption of a section of the district 10 kV electric grid takes into account the factors: – time, – meteorological conditions, – disconnections of individual power supply lines of cottages, – operating mode of electricity consumers. Predictive estimates of the power consumption of the power system have been obtained based on the data of the electricity consumed by the outdoor temperature, the type of day, etc. The model for predicting the magnitude of the consumed active and reactive power is quite workable, but at this stage still has a fairly high level of forecasting error. To improve the accuracy of forecasting, it is necessary to increase the database that makes up the training sample, because at the moment the available data cover a time period of only 3–4 months. The results of the analysis showed that forecasting reactive power consumption causes the greatest difficulties.

Data analysis; artificial neural networks; power consumption forecasting; set of factors; reliability of power supply systems; forecasting methods; neural network architecture.

Введение и актуальность работы. Электроэнергетика является ключевой отраслью российской экономики и многих стран мира. Основную информацию для планирования развития электроэнергетических систем составляют прогнозные оценки электропотребления. В зависимости от времени упреждения прогнозы делятся на прогнозирование долгосрочное, среднесрочное, краткосрочное и оперативное. Прогнозирование потребления электроэнергии является на сегодняшний день одной из важных научных и практических задач в электроэнергетике. Повышение точности прогнозирования обеспечивает экономию энергетических ресурсов, определяет эффективность управления электроснабжением и соответствующее увеличение прибыли энергетических предприятий. Если у крупных промышленных предприятий реальные показания потребления будут отличаться от заявленных в энергоснабжающую организацию объемов электроэнергии больше чем на 5%, на предприятие будут наложены штрафы [1]. По оценкам российских специалистов, каждая оплошность в ежегодном прогнозе электропотребления на 1% – это 4 млрд. долларов дополнительных инвестиций на возведение генерирующих мощностей [2]. Электрическая энергия в себестоимости продукции крупных предприятий, например, в металлургическом производстве, составляет 11% – 30%.

Проблема прогнозирования электропотребления заключается в том, что необходимо учесть огромное количество факторов, имеющих влияние на изменение энергопотребления. Задача составления заявки в энергоснабжающую организацию на объем электроэнергии обусловлен:

- ◆ своевременное получение информации о предстоящей нагрузке позволяет выбрать оптимальный режим работы системы электроснабжения;
- ◆ закупка электроэнергии осуществляется на основании прогнозирования собственного потребления;
- ◆ огромным количеством энергоресурсов затрачиваемым на пуски и остановки генерирующего оборудования.

Если реальные показания потребления будут отличаться от заявленных сумм больше чем на 5 %, на предприятие будут наложены штрафы [1].

Временной ряд почасового электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей зависит от множества факторов, часть из которых несут недетерминированный характер [3]. Данное обстоятельство делает задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления (short-term load forecasting – STLF) для данного временного ряда слабоформализуемой.

В электроэнергетических системах осуществляется непрерывное круглосуточное регулирование технологического режима работы объектов диспетчеризации по мощности, обеспечивающее [1]:

- ◆ поддержание частоты электрического тока в установленных пределах;
- ◆ поддержание потоков мощности в объектах электросетевого хозяйства, в пределах допустимых значений;
- ◆ изменение заданных режимов работы энергосистемы при изменении фактического электроэнергетического режима энергосистемы.

Суточный диспетчерский график является основным инструментом управления энергосистемой [4]. Для выполнения регулирования технологического режима необходим диспетчерский график электрической нагрузки, получаемый с помощью прогнозирования. Прогнозирование электроэнергетических режимов энергосистемы осуществляется для следующих периодов времени: один час, 2 и более часа, одни сутки, один месяц, один квартал, один год, 5 лет. Краткосрочное прогнозирование электроэнергетических режимов энергосистем и технологических режимов работы объектов электроэнергетики осуществляется на предстоящие сутки и выполняется диспетчерскими центрами всех уровней [5].

В условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы [6–8]. С развитием автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (далее – АИИС КУЭ) на предприятии появляется возможность осуществлять учет потребленной электроэнергии не только по предприятию в целом, но и по его отдельным участкам, цехам, производственным линиям.

Таким образом, для обеспечения устойчивой работы электроэнергетической системы актуальной и имеющей большое практическое значение научно-технической задачей является разработка методики прогнозирования потребления электрической энергии с заданной дискретностью на основе изучения системных свойств и связей в электротехническом комплексе и составления моделей статистических данных.

Отсюда целью данного исследования является:

- ◆ разработка математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 10 кВ с помощью аппарата искусственных нейронных сетей;
- ◆ повышение энергоэффективности прогнозирования потребления электрической энергии обеспечивающей снижение погрешности прогнозирования относительно применяемого метода прогнозирования;

♦ увеличение точности предсказания предполагаемого потребления электроэнергии с целью оптимального использования энергоресурсов.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать нейросетевую модель прогнозирования электропотребления, включающую обработку данных обучающей выборки, индикацию времени суток, оптимизацию числа нейронов в слоях и переобучение сети на основе текущих фактических значений электропотребления.

Выбор метода прогнозирования. В литературе хорошо освещен вопрос прогнозирования электрических нагрузок на разные временные горизонты. Методы повышения точности STLF можно подразделить на: методы математической статистики, методы искусственного интеллекта и гибридные методы [9]. Однако, в условиях неопределенности, традиционные методы математической статистики или имитационного моделирования не позволяют строить адекватные модели объектов [14]. Прогнозирование почасового потребления с упреждением «на сутки вперед» должно осуществляться с погрешностью ~ 5%.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие таких областей информационных технологий, как искусственный интеллект, системы обработки больших объемов данных (Big Data) и глубокое машинное обучение. Анализ публикаций по рассматриваемой теме показал, что при прогнозировании электропотребления главным образом используются методы на основе искусственных нейронных сетей [18]. Гораздо реже используются другие методы: регрессионные модели [10], метод анализа главных компонент [12], статистические методы [13], метод максимального правдоподобия [6]. При краткосрочном прогнозировании чаще используются искусственные нейронные сети с нелинейными функциями активации. Прогнозирование выполняется как с учетом, так и без учета дополнительных факторов: температуры, типа дня (рабочий выходной, праздничный) и др. Конфигурация искусственной нейронной сети зависит от графика электропотребления, который определяется объектом прогнозирования (энергосистема, город, предприятие и т.д.). В некоторых работах (например, [11]) используется разбиение исходных данных по электропотреблению на кластеры по дням недели.

Важным достоинством искусственных нейронных сетей (ИНС) – математических моделей, является возможность факторного прогнозирования. При этом сеть имеет N входов, каждый из которых соответствует какому-либо фактору, оказывающему влияние на прогнозный параметр. Подача на вход сети вместе с предысторией электропотребления значимых факторов (температура, тип дня и др.) способствует повышению точности прогноза. При этом сеть сама определяет зависимости между факторами, корректируя свои параметры при обучении. Таким образом могут быть смоделированы достаточно сложные регрессионные зависимости. Многослойный персептрон может формировать на выходе произвольную многомерную функцию при соответствующем выборе количества слоев, диапазона изменения сигналов и параметров нейронов.

Для прогнозирования были применены рассмотренные выше типы ИНС. Размерность ИНС (число скрытых слоев и число нейронов в этих слоях) в каждом конкретном случае определялась экспериментальным путем. Прогнозирование потребления электроэнергии представляет собой многоэтапный и многоуровневый процесс.

В работе использованы методы математического моделирования, обработки данных и прогнозирования временных рядов; статистический и регрессионный анализ; теория искусственных нейронных сетей; математические пакеты MatLab (Neural Networks Toolbox).

На основании анализа, проведенного в [10], почасовое электропотребление электротехнического комплекса участка районной электрической сети можно представить в виде функции влияющих факторов:

$$y = f_1(x_1, x_2, \dots, x_c) + f_2(x_{c+1}, x_{c+2}, \dots, x_l) + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – почасовое электропотребление электротехнического комплекса участка районной электрической сети; f_1, f_2 – функциональные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между влияющими факторами и почасовым электропотреблением; x_1, x_2, x_c – набор эндогенных факторов; $x_{c+1}, x_{c+2}, \dots, x_l$ – набор экзогенных факторов; l – общее количество влияющих факторов; ε – шумовая составляющая.

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_h \end{bmatrix} = f_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_c) + f_2(\bar{x}_{c+1}, \bar{x}_{c+2}, \dots, \bar{x}_l), \bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{i24} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где Y – вектор суточного электропотребления электротехнического комплекса участка районной электрической сети; $h=24$ – количество часов в сутках;

Так как, стандартные метода математической статистики, такие как корреляционный и регрессионный анализ, мало пригодны для прогнозирования поведения такой сложной функциональной зависимости, как временной ряд электропотребления участка районной электрической сети, необходимо прибегнуть к инструментам нейросетевого анализа. Для представления выражения (2) в виде нейросетевой математической модели, рассмотрим принцип функционирования одного искусственного нейрона.

Синтез нейросети. В качестве выходных параметров выбраны показания отдельных счетчиков, а в качестве входных – наборы определяющих и влияющих параметров. В этом случае возможны две основных концепции построения структуры ИНС:

- ♦ использование полносвязного скрытого слоя, когда нейроны соединены по принципу «каждый с каждым» рис.1;

- ♦ настройка структуры связей скрытого слоя в соответствии с реальной структурой производства. При этом увеличиваются затраты на построение сети, но вместе с тем и возрастает точность прогноза [15].

При построение внутренней структуры прогнозной модели, определяющей зависимость выходных параметров от входных была выбрана ИНС типа «многослойный персептрон» содержала во входном слое 5 нейронов, в выходном – 2 нейрона.

Математически функционирование нейрона можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \\ v_j = u_j + b_j \\ O_j = \varphi(v_j), \end{cases} \quad (3)$$

где u_j – линейная комбинация входных воздействий на нейрон j ; w_{ij} – вес синаптической связи соединяющей вход i и нейрон j ; x_i – входной сигнал нейрона; v_j – индуцированное локальное поле нейрона; b_j – порог активации нейрона; O_j – выходной сигнал нейрона; $\varphi(v_j)$ – функция активации нейрона.

Структура ИНС определялась опытным путем. Число промежуточных слоев равнялось одному. Количество нейронов в промежуточном слое составило 10 нейронов. Как показали эксперименты, увеличение числа скрытых слоев не привело к лучшим результатам, а лишь усложнило процесс обучения.

Функция активации нейрона – сигмоид. Для удобства выкладок, выразим порог активации через дополнительную синаптическую связь с весом w_0 и фиксированным входным сигналом $x_0=1$:

$$O_j = \varphi(v_j) = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i. \quad (4)$$

Для настройки весов нейронной сети используется алгоритм обучения с учителем, известный как алгоритм обратного распространения ошибки. Метод определения количества нейронов скрытого слоя рассмотрен в [7].

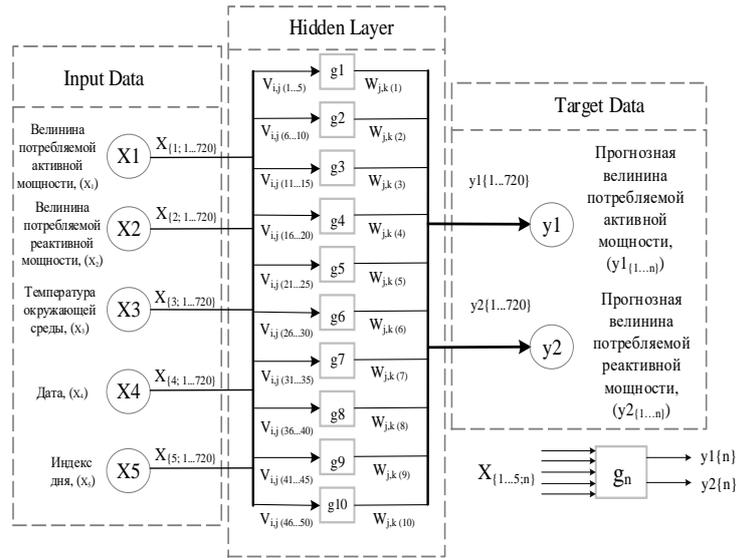


Рис. 1. Структура НС для прогнозирования величины потребляемой активной и реактивной мощности

Нейронная сеть, представленная на рис. 1, состоит из:

- ♦ входного слоя сенсорных элементов, которые получают информацию непосредственно из «внешней среды»;
- ♦ скрытых слоев, в которых происходят основные вычисления ИНС;
- ♦ выходного слоя, формирующего итоговый отклик нейронной сети.

Расположение нейронов послойно очень важно с вычислительной точки зрения, так как появляется возможность векторизовать процесс обработки данных в ИНС. Другими словами, все операции в ИНС производятся с помощью матричных операций сложения, скалярного произведения и т.д. По своей сути, выражение (4) представляет собой скалярное произведение векторов весовых коэффициентов w на вектор входных сигналов x . Если на вход нейронной сети подается вектор точных значений факторов, влияющих на электропотребление ГТП гарантирующего поставщика второго уровня, размером $n = 24 * 1$, то выражение (4) можно записать в виде:

$$O_j = \varphi_j \left(\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \right), \quad (5)$$

Тогда, общий отклик скрытого слоя ИНС, состоящего из k нейронов, можно представить в виде:

$$O_1 = f(W_{01}, X) = \begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \dots \\ O_k \end{bmatrix} = \varphi_k \left(\begin{bmatrix} w_{01} & w_{02} & \dots & w_{0n} \\ w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{k1} & w_{k2} & \dots & w_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

где O_1 – вектор отклика слоя первого скрытого слоя ИНС; W_{01} – матрица весовых коэффициентов между входным и первым скрытым слоем нейронной сети размером $n * k$;

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}.$$

- ♦ массив суточных значений влияющих факторов.

Далее, отклик O_1 становится входным сигналом для следующего слоя скрытого слоя нейронной сети, и, на основании выражения (6), рассчитывается отклик следующего слоя, и т.д. Итоговой отклик нейронной сети, который является почасовым прогнозом электропотребления ГТП ГП второго уровня, формируется на основании выражения:

$$Y = \varphi(W_{mh}O_m),$$

где W_{mh} – матрица весовых коэффициентов между последним скрытым слоем m и выходным слоем h ; O_m – отклик последнего скрытого слоя m .

В качестве основных входных данных используется 4 нейрона:

- ♦ использование самого прогнозируемого параметра – величина потребляемой активной и реактивной мощности 1 и 2 входы;
- ♦ использование набора определяющих параметров как основы для получения прогноза, с дополнительным учетом влияющих параметров – температура окружающей среды – 3 вход,
- ♦ текущая дата, служит для уточнения месяца и дня недели при прогнозе - 4 вход, 5 вход был введен для определения рабочих и выходных дней недели.

Дополнительно был введен параметр «индекс дня», для определения рабочих или выходных дней недели. Так, например, рабочим будням соответствует индекс – 1, для выходных – 0, для предпраздничных дней индекс – 0.5, т. к. это не выходные, но рабочий день несколько сокращен. Это работает следующим образом: в будние дни величина потребляемой мощности держится в одном диапазоне, а в праздничные дни или выходные сеть может видеть некоторое снижение потребляемой мощности. Введение данных индексов позволяет сети понять, что в выходные или праздничные дни потребление несколько уменьшается.

Для определения входных переменных нейронной сети при решении задач прогнозирования нагрузки была использована модель, описывающая изменения во времени фактических значений электропотребления, которая в общем виде представляется нелинейной функцией:

$$W_t = f(W_{t-n}, T_{t-n}, N_t) + \varepsilon_t, \quad (7)$$

где W_t – фактическое электропотребление энергосистемы в момент времени t ; t – текущее время; W_{t-n} – предшествующие наблюдения электропотребления; T_{t-n} – предшествующие наблюдения температуры окружающей среды; n – индекс ретроспективы данных; N_t – тип дня недели (рабочий, выходной, праздничный); ε_t – случайная составляющая, представляющая ненаблюдаемые факторы, влияющие на электропотребление.

Оценка точности прогноза ИНС на тестовом множестве размерностью P оценивается по среднему абсолютная ошибка в процентах (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100, \quad (8)$$

где y_i – фактическое значение нагрузки, \hat{y}_i – результат прогноза, p – количество данных.

Из анализа публикаций, приемлемой является ошибка прогноза не более 5%.

Были получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии, наружной температуры и типу дня. Данные были предварительно подготовлены – разделены на обучающее, контрольное и тестовое подмножества.

Обычно при обучении ИНС начальные веса связей задаются случайным образом. При использовании методики анализа электропотребления [8], имеется возможность жестко установить первоначальный вес связей, относящихся к входным нейронам сети в зависимости от того, определяющий это параметр, или влияющий. Благодаря этому сокращается время обучения сети, уменьшается вероятность попадания ИНС в локальные минимумы в процессе обучения.

Разработка модели прогнозирования. При разработке модели прогнозирования, целесообразно сгруппировать дни не дели, схожие по ЭП. В работе [19] был предложен подход, позволяющий выделить следующие типы дней в неделе:

- ◆ рабочий день;
- ◆ выходной день;
- ◆ праздничный день.

Такой подход оправдан, поскольку характер ЭП по этим дням различается. Так, например, в рабочие дни ЭП в большей степени зависит от технологических процессов промышленных предприятий, планов выпуска продукции, графика рабочего времени, в то время как в выходные и праздничные дни больший вес имеют социальные явления, период светового дня и другие факторы.

Предложенная математическая модель прогнозируемого объема электропотребления (ЭП) – это функция от следующих переменных:

$$V_2(t) = \{M, N, T_{cp}, t, h, V_1, T_n\}, \quad (9)$$

где $V_2(t)$ – прогнозируемая величина объемов потребляемой электроэнергии; $V_1(t)$ – текущая величина объемов потребляемой электроэнергии; M – порядковый номер месяца в году; N – порядковый номер дня в месяце; T_{cp} – среднесуточная температура окружающего воздуха; h – флаг для рабочего или выходного дня (1 – рабочий, 0 – выходной); T_n – тариф на электроэнергию; t – часовой интервал времени.

При создании обучающей выборки входные сигналы нейронной сети представляются параметрами t , V_1 , N , T_{cp} , n , h , а эталонные значения – параметром V_2 .

Постановка задачи. Рассмотрим пример помесячного прогнозирования электропотребления предприятием.

С применением ИНС. В качестве исходных данных использованы следующие величины:

- ◆ максимальное почасовое электропотребление энергосистемы (рис. 1–6, синий график);
- ◆ средние по энергосистеме почасовые значения температуры за один месяц;
- ◆ количество выходных в месяце;
- ◆ продолжительность дня;
- ◆ плановые объемы производства на месяц;
- ◆ максимальное и минимальное месячные значения потребления за предыдущий год.

Была проанализирована динамика изменения электропотребления региональной энергосистемы [20–22] в зависимости от температуры окружающей среды. Влияние температуры на электропотребление промышленности связано с изменением мощности, потребляемой на обогрев помещений и вентиляцию. Сезонные колебания электропотребления имеют явно выраженную регулярную компоненту, на которую накладываются нерегулярные колебания, вызванные изменением погодных условий, в первую очередь температуры и освещенности, а также влиянием других нерегулярных факторов. Нейросетевое моделирование в полной мере учитывает сезонность и нелинейность процесса. Для адекватного описания сезонного процесса электропотребления для некоторых моделей ИНС достаточно двух полных периодов массива предыстории. На основе анализа данных был сделан вывод, что электропотребление реагирует на изменения температуры с запаздыванием на 12 часов. Таким образом, для прогнозирования с использованием погодных условий прогноз температуры окружающего воздуха на следующие 12 часов не требуется, что позволяет повысить точность прогнозирования электропотребления. Прогнозирование электропотребления с помощью ИНС дает хорошие результаты [9].

Фрагмент ретроспективных данных Ростовской энергосбытовой компании о потребляемой электроэнергии ЭП, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Ретроспективные данные об электропотреблении в Ростовской области

Дата	Час суток	Ср. температура	Потребление энергии (Активная)	Потребление энергии (Реактивная)
9/1/2018	1	2.8 C	2095,91	569,56
	2		2062,43	540,85
	3		2029,15	582,20

При создании обучающей выборки входные сигналы нейронной сети представляются параметрами t , T_n , $V1_{ээ}$, N , $T_{ср}$, h . Фрагмент обучающей выборки данных об ЭП Ростовской энергосбытовой компании показан в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент обучающей выборки нейросети

Дата	Входы нейросети						Выходы нейросети		
	t	T_n	$V1$		N	$T_{ср}$	h	$V2$	
9/01/2018	1	2.55	1938,84	504,10	9	2.8	1	1908,14	496,12
	2	2.55	1908,14	496,12				1875,52	487,63
	3	2.55	1875,52	487,63				1813,05	471,39
	4	2.55	1813,05	471,39				1859,34	483,43
	5	2.55	1859,34	483,43				1907,25	495,89

Фрагмент общей базы данных обучающей выборки нейросети представлен в табл. 3.

День	Месяц	Год	P	Q	час	Тариф	Температура	Тип
9,00	1,0	2018	1908,14	496,12	2,0	2,55	0,0	1,0
9,00	1,0	2018	1875,52	487,63	3,0	2,55	-1,0	1,0
9,00	1,0	2018	1813,05	471,39	4,0	2,55	-1,0	1,0

9,00	1,0	2018	1859,34	483,43	5,0	2,55	0,0	1,0
9,00	1,0	2018	1907,25	495,89	6,0	2,55	1,0	1,0
9,00	1,0	2018	2056,75	534,76	7,0	5,53	1,5	1,0
9,00	1,0	2018	2207,18	573,87	8,0	5,53	2,0	1,0

Результаты исследований. Прогнозирование электропотребления осуществлялось при длине интервала предыстории 30 суток, так как опытным путем было установлено, что для этих интервалов характерны меньшие ошибки прогнозных оценок. На рис. 1, 2 представлен месячный ряд почасовых значений потребляемой электрической энергии энергосистемы (счетчик AP-202 – аэропорт) Краснодарского края в весенний период, на котором видна суточная периодичность электропотребления и заметна характерная особенность месячного цикла – снижение потребления электрической энергии в выходные дни. Выбор функции масштабирования зависит сугубо от начальных зависимостей в данных. Все входные параметры необходимо нормализовать на отрезке значений от 0 до 1. Нормализация достигается за счет деления каждой компоненты входного вектора на длину самого вектора. Длина вектора находится извлечением квадратного корня из суммы квадратов всех компонент вектора:

$$X_i^x = \frac{X_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}}$$

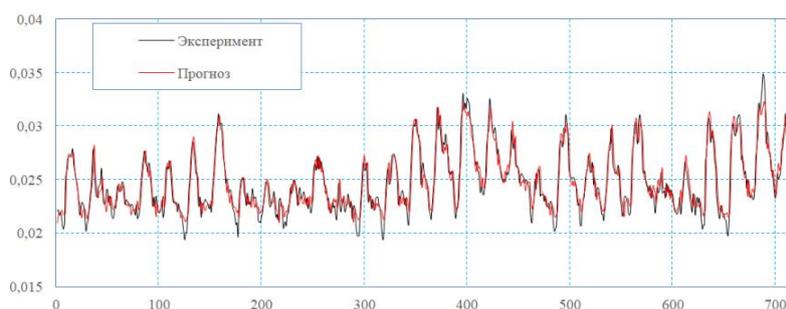


Рис. 1. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой активной мощности AP-202 за май 2019 г.

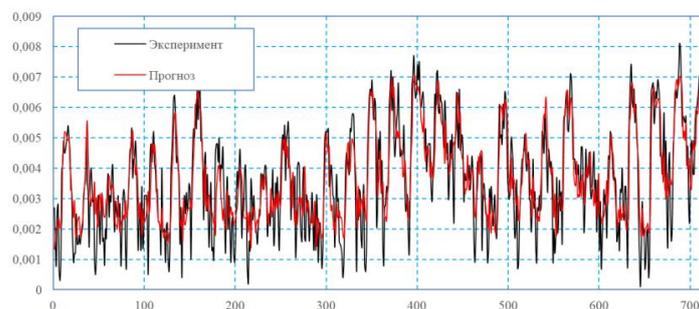


Рис. 2. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой реактивной мощности AP-202 за май 2019 г.

Цель процесса обучения заключается в нахождении оптимальных значений весовых коэффициентов, при которых нейронная сеть выдаёт значение в пределах заданной погрешности для всех обучающих выборок. Для реализации нейронносетевых концепций разработано большое количество специализированных программных средств. Пакет фирмы «The MathWorks» MATLAB также предоставляет пользователям возможность работы с нейронными сетями. Использование «Neural Network Toolbox» совместно с другими средствами MATLAB открывает широкий простор для эффективного комплексного использования современных математических методов для решения самых разных задач прикладного и научного характера [10]. Для построения нейронной сети использовался встроенный функционал Matlab.

Анализ данных показал, что форма графиков носит циклический характер, электропотребление обладает сезонностью. Одной из циклических составляющих графика потребления является суточный цикл. Вечерний максимум суточных графиков нагрузки выше утреннего. Выходные дни характеризуются более медленным нарастанием нагрузки в дневной части суток по сравнению с рабочими днями.

Погрешность			
Активная мощность		Реактивная мощность	
Ср. значение %	3.2 %	Ср. значение %	12.3 %
Макс. значение %	17.1 %	Макс. значение %	21.4 %

На рис. 3, 4 представлен недельный ряд почасовых значений потребляемой электрической энергии энергосистемы (счетчик AP-103) Краснодарского края в весенний период.

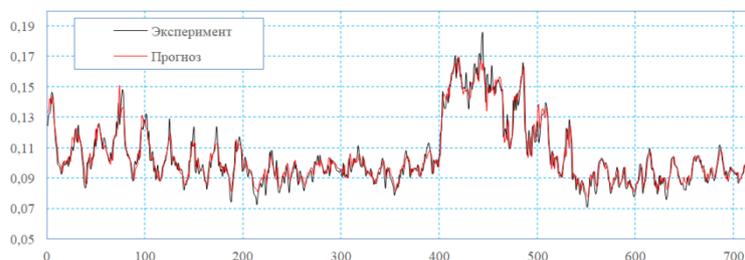


Рис. 3. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой активной мощности AP-103 за апрель 2019 г.

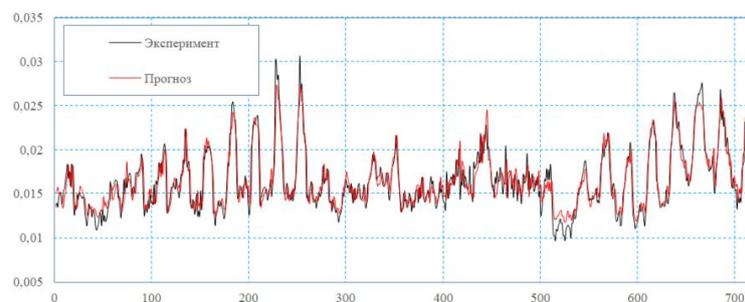


Рис. 4. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой реактивной мощности AP-103 за апрель 2019 г.

Погрешность			
Активная мощность		Реактивная мощность	
Ср. значение %	4.08 %	Ср. значение %	6.64 %
Макс. значение %	16.51 %	Макс. значение %	27.56 %

На рис. 5, 6 представлен недельный ряд почасовых значений потребляемой электрической энергии энергосистемы (счетчик AP-103) Краснодарского края в весенний период

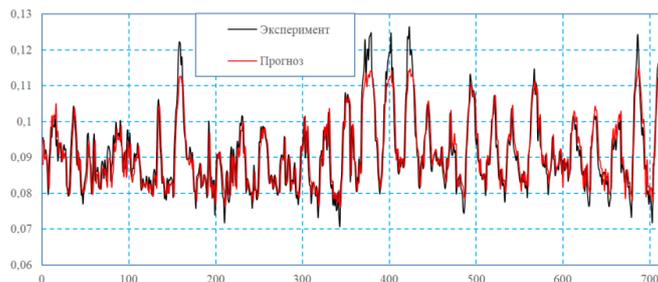


Рис. 5. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой активной мощности AP-103 за май 2019 г.

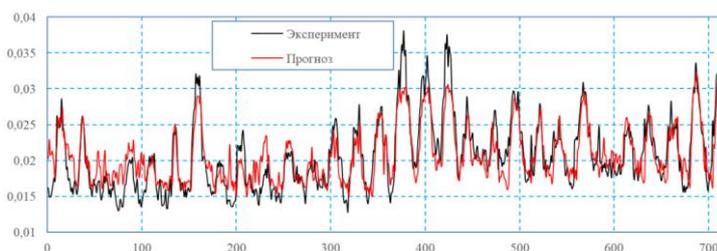


Рис. 6. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой реактивной мощности AP-103 за май 2019 г.

Погрешность			
Активная мощность		Реактивная мощность	
Ср. значение %	4.15 %	Ср. значение %	10.21 %
Макс. значение %	18.11 %	Макс. значение %	34.47 %

Заключение:

1. Разработанная НС математическая модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных.

2. Получена НС модель краткосрочного прогнозирования электропотребления аэропорта участка районной электрической сети 10 кВ, учитывающая факторы: – времени, – метеорологических условий, – отключений отдельных питающих линий электропередач, – режима работы потребителей электроэнергии.

3. Получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии наружной температуры, типу дня и т.д. Модель прогнозирования величины, потребляемой активной и реактивной мощности вполне работоспособна, однако на данном этапе все еще имеет довольно высокий уровень погрешности прогнозирования.

4. Для повышения точности прогнозирования необходимо увеличить базу данных, составляющих обучающую выборку, т.к. на данный момент имеющиеся данные охватывают временной промежуток длиной лишь 3-4 месяца.

5. Из полученных результатов можно заметить, что наибольшие трудности вызывает прогнозирование потребления реактивной мощности.

6. Влияние температуры на электропотребление. Известно, что электропотребление растет в холодные и жаркие дни. Однако при краткосрочном прогнозировании (сутки вперед) учет температуры не приводит к улучшению точности прогноза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Об электроэнергетике: Федеральный закон РФ от 26.03.2003 № 35-ФЗ // Российская газета. – 1 апр. 2003. – С. 1.
2. Рудаков Е., Саакян Ю., Нигматулин Б., Прохорова Н. Цена расточительности // Эксперт. – № 24 / июня 2008.
3. Серебряков Н.А., Хомутов С.О. Анализ случайной составляющей временного ряда электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 5 (175). – С. 153-158.
4. Планирование электроэнергетических режимов работы энергообъектов и энергосистем // Сайт АО «Системный оператор Единой энергетической системы». – URL: http://so-ups.ru/index.php?id=regime_plan (14.06.2016).
5. Dubyago M., Polyuyanovich N., Azarov N., Ogrenichev A. Development and research of the forecasting methods of the cable lines throughput using artificial neural networks // Proceedings – ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2020. – P. 9278503.
6. Доманов В.И., Билалова А.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59-65.
7. Полуянович Н.К., Азаров Н.В., Огреничев А.В., Дубяго М.Н. Многоэтапный метод краткосрочного прогнозирования температурных режимов в силовом кабеле // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 38-51.
8. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Анализ и выбор методики в решении задач интеллектуализации систем прогнозирования термофлуктуационных процессов в кабельных сетях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 52-66.
9. Zheng H., Yuan J., Chen L. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation // Energies. – 2017; 10:1-20. – DOI: 10.3390/en10081168.
10. Шарифуллин В.Н., Шарифуллина А.В. Нейросетевое прогнозирование потребления электроэнергии промышленным предприятием // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2012. – № 2 (13). – С. 6-11.
11. Доманов В.И., Билалова А.И. Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4-3. – С. 535-537.
12. Киртичникова И.М., Саплин Л.А., Соломахо К.Л. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 16-22.
13. Варфоломеева А.А. Локальные методы прогнозирования с выбором метрики // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т. 1, № 3. – С. 367-375.
14. Сунагатов И.М. Анализ и модификация метода прогнозирования энергопотребления с помощью экстраполяции выборки максимального подобию // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1 (37). – С. 223-226.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – 2-изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

16. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (205). – С. 51-62.
17. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Азаров Н.В., Огреничев А.В.* Нейросетевой метод в задачах прогнозирования электропотребления в электроэнергетической системе // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 114-118.
18. *Кулбараков М.А.* К задаче прогнозирования энергопотребления с помощью нейронных сетей // Молодой ученый. – 2014. – № 11 (70). – С. 22-25. – URL: <https://moluch.ru/archive/70/12122/> (дата обращения: 05.12.2021).
19. *Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y.* The influence of the electromagnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks // International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021. – 2021. – P. 9590839.
20. *Пилюхов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Беляев В.Е., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П.* Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 192-200.
21. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог, 2014.
22. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.

REFERENCE

1. Ob elektroenergetike: Federal'nyy zakon RF ot 26.03.2003 № 35-F3 [About the electric power industry: Federal Law of the Russian Federation No. 35-F3 of 26.03.2003], *Rossiyskaya Gazeta* [Russian newspaper], 1 Apr. 2003, pp. 1.
2. *Rudakov E., Saakyan Yu., Nigmatulin B., Prokhorova N.* Tsena rastochitel'nosti [The price of wastefulness], *Ekspert* [Expert], No. 24 / June iyunya 2008.
3. *Serebryakov N.A., Khomutov S.O.* Analiz sluchaynoy sostavlyayushchey vremennogo ryada elektricheskoy nagruzki gruppy toчек postavki elektroenergii sel'khozproizvoditeley [Analysis of the random component of the time series of the electric load of the group of points of electricity supply of agricultural producers], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2019, No. 5 (175), pp. 153 -158.
4. Planirovanie elektroenergeticheskikh rezhimov raboty energoob"ektov i energosistem [Planning of electric power modes of operation of power facilities and power systems], *Sayt AO «Sistemnyy operator Edinoy energeticheskoy sistemy»* [Website of JSC "System Operator of the Unified Energy System"]. Available at: http://so-ups.ru/index.php?id=regime_plan (14.06.2016).
5. *Dubyago M., Polyuyanovich N., Azarov N., Ogrenichev A.* Development and research of the forecasting methods of the cable lines throughput using artificial neural networks, *Proceedings – ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2020, pp. 9278503.
6. *Domanov V.I., Bilalova A.I.* Prognozirovaniye ob"emov energopotrebleniya v zavisimosti ot iskhodnoy informatsii [Forecasting the volume of energy consumption depending on the initial information], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. The series "Energy"], 2016, Vol. 16, No. 2, pp. 59-65.
7. *Poluyanovich N.K., Azarov N.V., Ogrenichev A.V., Dubyago M.N.* Mnogoetapnyy metod kratkosrochnogo prognozirovaniya temperaturnykh rezhimov v silovom kabele [Multi-stage method of short-term forecasting of temperature regimes in a power cable], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 38-51.
8. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Analiz i vybor metodiki v reshenii zadach intellektualizatsii sistem prognozirovaniya termoflukuatsionnykh protsessov v kabel'nykh setyakh [Analysis and choice of methodology in solving problems of intellectualization of forecasting systems of thermal fluctuation processes in cable networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 52-66.

9. Zheng H., Yuan J., Chen L. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation, *Energies*, 2017; 10:1-20. DOI: 10.3390/en10081168.
10. Sharifullin V.N., Sharifullina A.V. Neyrosetevoye prognozirovanie potrebleniya elektroenergii promyshlennym predpriyatiem [Neural network forecasting of electricity consumption by an industrial enterprise], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University], 2012, No. 2 (13), pp. 6-11.
11. Domanov V.I., Bilalova A.I. Analiz prognozirovaniya energopotrebleniya s razlichnymi informatsionnymi bazami [Analysis of energy consumption forecasting with various information bases], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, Vol. 16, No. 4-3, pp. 535-537.
12. Kirpichnikova I.M., Saplin L.A., Solomakho K.L. Prognozirovanie ob'emov potrebleniya elektroenergii [Forecasting the volume of electricity consumption], *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2014, Vol. 14, No. 2, pp. 16-22.
13. Varfolomeeva A.A. Lokal'nye metody prognozirovaniya s vyborom metriki [Local forecasting methods with a choice of metrics], *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh* [Machine learning and data analysis], 2012, Vol. 1, No. 3, pp. 367-375.
14. Sunagatov I.M. Analiz i modifikatsiya metoda prognozirovaniya energopotrebleniya s pomoshch'yu ekstrapolyatsii vyborki maksimal'nogo podobiya [Analysis and modification of the method of forecasting energy consumption using the extrapolation of the maximum similarity sample], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2013, No. 1 (37), pp. 223-226.
15. Khaykin S. Neyronnye seti: polnyy kurs [Neural networks: a complete course]. 2nd. ed.: transl. from engl. Moscow: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.
16. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Prognozirovanie resursa kabel'nykh liniy s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the resource of cable lines using the method of artificial neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (205), pp. 51-62.
17. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Azarov N.V., Ogrenichev A.V. Neyrosetevoy metod v zada-chakh prognozirovaniya elektropotrebleniya v elektroenergeticheskoy sisteme [Neural network method in the tasks of forecasting electricity consumption in the electric power system], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2022, No. 1, pp. 114-118.
18. Kulbarakov M.A. K zadache prognozirovaniya energopotrebleniya s pomoshch'yu neyronnykh setey [On the problem of forecasting energy consumption using neural networks], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2014, No. 11 (70), pp. 22-25. Available at: <https://moluch.ru/archive/70/12122/> (accessed: 05 December 2021).
19. Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y. The influence of the electromagnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks, *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*, 2021, pp. 9590839.
20. Pshikhopov V.Kh., Gayduk A.R., Medvedev M.Yu., Belyaev V.E., Poluyanovich N.K., Voloshchenko Yu.P. Energoberegayushchee upravlenie tyagovymi privodami elektropodvizhnogo sostava [Energy-saving control of traction drives of electric rolling stock], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 192-200.
21. Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A. Ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog, 2014.
22. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент М.Г. Левина.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 621.372.83.001.24

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-46-56

В.С. Мараев

АВТОМАТИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

Работа посвящена исследованию и автоматизации математического моделирования процесса нагрева элементов тонкостенного алюминиевого волноводного тракта при отработке технологической процедуры индукционной пайки. В статье проводится обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки. В качестве математической модели нагрева волноводного тракта с целью отработки технологического процесса индукционной пайки используется мгновенный источник нагрева в плоском стержне. В рамках данной работы была спроектирована и реализована функциональная автоматизированная подсистема математического моделирования технологического процесса индукционной пайки тонкостенных металлических волноводов космических летательных аппаратов. Функционал приложения позволяет производить автоматизированное построение математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами, выполняя расчёты температурных значений деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора. Полученный программный продукт является оптимальным решением для интеграции с системой, производящей управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в качестве генератора математических моделей процесса индукционной пайки для обучения алгоритма. Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах. Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов, включающего генератор индукционного нагрева, индуктор, манипулятор-позиционер, промышленный компьютер IPPC-9171G-07BTO с консолью управления. Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильности её реализации в разработанном программном приложении. Рассчитаны значения среднеквадратичных отклонений результатов моделирования и реальных технологических процессов индукционной пайки волноводных трактов. В результате натурных и модельных экспериментов установлено, что реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточной высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Волноводный тракт; индукционная пайка; моделирование процесса; разработка приложения; математическая модель; автоматизация процесса; верификация модели; автоматизированное управление.

V.S. Marayev

AUTOMATION OF MATHEMATICAL MODELING OF THE INDUCTION SOLDERING TECHNOLOGICAL PROCESS

The paper has devoted to the research and automation of mathematical modeling of the process of heating the elements of the thin-walled aluminum waveguide path when working out the induction soldering technological procedure. The paper has reviewed the method of mathematical modeling of the induction soldering technological process. In order to develop the technological process of induction soldering, an instant source of a flat rod heating is used as a mathematical model of waveguide path heating. As part of this work, a functional automated subsystem of mathematical modeling of the induction soldering technological process of thin-walled metal waveguides of cosmic aircraft was designed and implemented. The functionality of the application allows you to make an automated construction of the mathematical model of the induction soldering technological process with specified parameters, performing calculations of the temperature values of the part-components participating in the process of the induction soldering, depending on the specified sizes, structural-physical and thermodynamic characteristics, the power of the inductor and the position of the flange/couplings relative to the inductor. The obtained software product is an optimal solution for integration with the system that produces the process of controlling the induction soldering of the waveguide paths of spacecraft as a generator of mathematical models of the induction soldering process for machine learning. Comparative researches of the induction soldering models have carried out, which builds the mathematical module of the program for their compliance with the real process in permissible limits. Experiments have conducted on a software system for controlling the induction soldering process of the waveguide paths, including an induction heating generator, an inductor, a manipulator, an IPPC-9171G-07BTO industrial computer with a control console. An experimental verification of the correctness of the selected mathematical model of the induction soldering technological process and the correctness of its implementation in the developed software application has performed. The MSE values of the results of modeling and real technological processes of induction soldering have calculated. As a result of attentive and model experiments, it has established that the application of the induction heating of the elements of thin-walled aluminum waveguide paths of cosmic aircraft with a sufficiently high accuracy simulates this technological process.

Waveguide path; induction soldering; process modeling; application development; mathematical model; process automation; model verification; automated control.

Введение. Метод создания неразъемных соединений на основе индукционного нагрева широко используется при производстве тонкостенных алюминиевых волноводных трактов в аэрокосмической промышленности. Применение паяных тонкостенных волноводных трактов в составе конструкции космических аппаратов позволяет сократить межблочные расстояния между элементами полезной нагрузки, размещая ее при этом более компактно. Это, в свою очередь, позволяет снизить габариты и массу космических аппаратов на 15–20%, либо увеличить пропускную способность космических аппаратов при заданном ограничении по массе [1–3].

Однако применение таких высоко технологичных методов формирования неразъемных соединений усложняется наличием ряда внешних факторов, наибольшую сложность из которых представляют:

- 1) низкая степень повторяемости неавтоматизированного (ручного) процесса пайки/сварки;
- 2) сложность, а порой и невозможность визуального контроля нагрева деталей;
- 3) искажение электромагнитных полей оборудования, вследствие его взаимодействия с различными проводящими телами, находящимися вблизи зоны нагрева;
- 4) наложение помех на средства измерения, использующиеся при автоматизации процессов сварки/пайки, за счет действия мощных источников излучений вблизи процесса;

- 5) большие экономические потери при досрочном прекращении технологического процесса вследствие сбоя аппаратного или программного обеспечения;
 б) влияние человеческого фактора [4–6].

Выше обозначенные проблемы управления современными процессами формирования неразъемных соединений могут быть решены в результате внедрения интеллектуальных технологий обработки информации и принятия решений в условиях неопределенности, что позволит проводить оценку достоверности получаемой из зоны нагрева информации, оценивать погрешности средств измерения и формировать адекватное управление технологическим процессом с целью повышения его точности и повторяемости [7–9].

Однако для внедрения подобных интеллектуальных методов необходимы высокоточные математические модели технологического процесса индукционной пайки. Таким образом, актуальной задачей является обзор, подбор и автоматизация разработки математических моделей для каждого элементов волноводного тракта.

В данной статье мы проведем обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки, спроектируем и реализуем программное обеспечение для автоматизации моделирования процесса индукционной пайки и проведем сравнительное исследование построенных моделей на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах, таким образом проведем верификацию разработанного приложения и выбранных математических моделей, построенных с его применением.

Математическая модель технологического процесса индукционной пайки. В качестве математической модели нагрева волноводного тракта с целью отработки технологического процесса индукционной пайки используется мгновенный источник нагрева в плоском стержне (1):

$$T(x, t) = \int_0^t \frac{Q}{Fcp\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{(-\frac{x^2}{4\alpha t} - bt)} + d. \quad (1)$$

$$b = \frac{\alpha p}{cpF}, \quad (2)$$

где Q – количество тепла [Дж], F – поперечное сечение трубы [м^2], x – расстояние от источника тепла [м], cp – объемная теплоемкость [$\text{Дж}/\text{м}^3$], t – время [сек], b – коэффициент тепловой конвекции во внешнюю среду с поверхности стержня (2), d – поправочный коэффициент (высчитывается эмпирически) [К], α – коэффициент теплопроводности [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], p – периметр сечения [м] [10].

В качестве примера элемента волноводного тракта возьмем тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта. Для моделирования процесса нагрева трубы сборки волноводного тракта следует исходить из соображений, что:

- 1) труба волноводного тракта представляет собой достаточно длинное тело из однородного материала,
- 2) труба волноводного тракта имеет относительно одинаковое поперечное сечение по всей длине,
- 3) труба волноводного тракта имеет схожий механизм теплопередачи и теплопроводности [11–15].

Из чего можно сделать вывод, что математическая модель плоского источника тепла в стержне справедлива для плоского источника тепла в прямоугольной трубе сборки волноводного тракта [16–18]. Таким образом мы вводим лишь геометрическое ограничение с одной стороны стержня, обозначая и учитывая ограниченность трубы со стороны вылета фланца при формировании соответствующего соединения [19–21]. Делая допущение о том, что волноводная труба равномерно нагревается по всему сечению, так как толщина стенок составляет 2 мм, а конст-

рукция индуктора такова, что вызывает равномерный нагрев по ее периметру. На рис. 1 показана типовая труба сборки волноводного тракта в реалистичном изображении.



Рис. 1. Концептуальное изображение трубы сборки волноводного тракта

Расчётная формула (3) для процесса нагрева волноводной трубы с привязкой к конкретному типоразмеру в таком случае представляет собой:

$$T(x, t) = \sum_{j=\{-1,1\}} \frac{Q}{Fcp\sqrt{4at}} \exp\left(-\frac{(x+jl)^2}{4at} - bt\right) + d. \quad (3)$$

Для экспериментального построения и последующей верификации примера модели технологического процесса индукционной пайки трубы сборки волноводного тракта возьмём конкретную трубу типоразмерами 22 x 11 мм. Её проекции изображены на рис. 2, где F – площадь сечения трубы, p – периметр сечения.

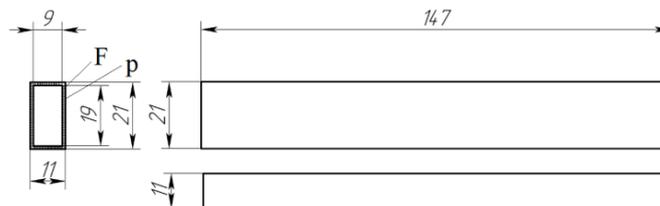


Рис. 2. Проекция трубы сборки волноводного тракта с типоразмерами

На рис. 3 представлен график модели нагрева трубы сборки волноводного тракта для разных значений мощности источника индукционного нагрева, где: синий график – температура трубы при мощности нагрева 11 кВт, оранжевый график – температура трубы при мощности нагрева 5 кВт, зеленый график – температура трубы при мощности нагрева 3 кВт.

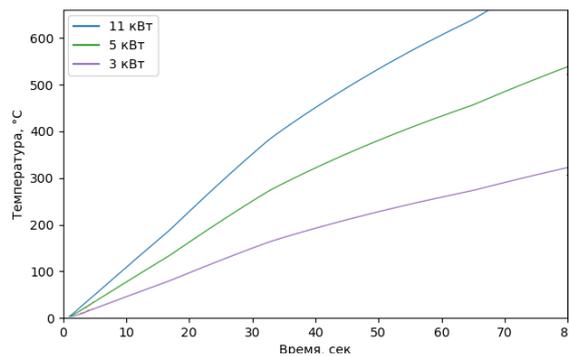


Рис. 3. График модели нагрева трубы сборки волноводного тракта

Следует автоматизировать моделирование технологического процесса индукционной пайки и провести верификацию выбранной математической модели нагрева волноводного тракта в процессе индукционной пайки на экспериментальных данных.

Автоматизация моделирования технологического процесса индукционной пайки. В качестве средства автоматизации моделирования технологического процесса индукционной пайки разработано настольное программное обеспечение на C++. В качестве основного фреймворка для разработки интерфейса выбран Qt 6.0.2. Qt – фреймворк для разработки кроссплатформенного программного обеспечения на языке программирования C++. Также, при разработке дополнительно использовались такие Qt библиотеки как QCustomPlot, QCore, QWidget, QtDataVisualization 1.15, QVector и т.д.

Архитектура программного продукта представлена на рис. 4 в виде краткой диаграммы классов. Изложим функции и задачи основных классов, а также их отношений.

- 1) MainWindow является одним из главных классов и реализует пользовательский интерфейс приложения, включая всю интерфейсную логику взаимодействия.
- 2) Класс Soldering выступает в роли контроллера построения математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами.
- 3) Класс MathModel выполняет построение математической модели технологического процесса индукционной пайки, выполняя расчёты температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора.

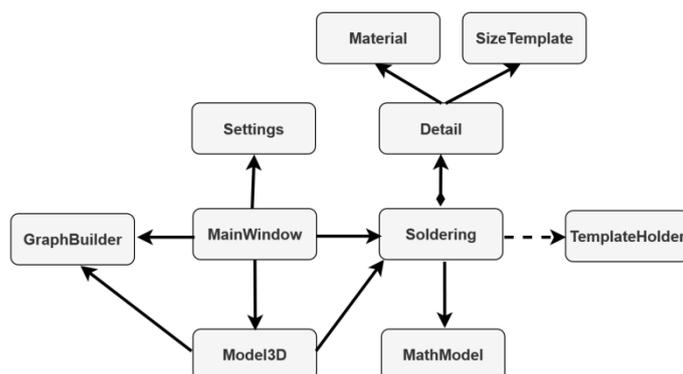


Рис. 4. Архитектура приложения

4) Класс Detail является абстракцией детали для пайки и содержит данные о компоненте сборки тракта, включая его тип (труба, фланец, муфта)

5) Класс Material реализует логику взаимодействия с физико-структурными и термодинамическими данными о материале компонента, включая его тип (алюминий, медь, сталь и др.), теплопроводность, объёмную теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи и др.

6) Класс SizeTemplate реализует логику взаимодействия с типоразмерами компонента, включая его длину, ширину, высоту, толщину стенок и др.

7) Класс GraphBuilder отвечает за построение 2d-графиков и реализует средства визуализации результата моделирования в виде графиков зависимости температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки от времени (продолжительности пайки) и точки измерения температуры.

8) Классы TemplateHolder является вспомогательным и хранит в себе данные макросов для быстрого ввода данных типоразмеров, характеристик материала, технологических параметров пайки и параметров моделирования.

9) Класс Settings реализует наличие гибких настроек приложения.

10) Класс Model3D отвечает за построение 3d-модели компонента в процессе индукционной пайки с визуальным цветовым отображением температурных характеристик.

Запуск программы происходит путем открытия исполняемого файла SolderingMathModel.exe. При запуске программы открывается главное окно приложения, изображенное на рис. 5. В данном окне пользователю предоставлен ряд возможностей:

1) вводить данные о компоненте сборки тракта, включая его тип (труба, фланец, муфта), его типоразмеры (длина, ширина, высота, толщина стенок и др.) (рис. 5, левый-верхний блок), его материал (алюминий, медь, сталь и др.) и термодинамические характеристики материала (теплопроводность, объёмная теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи и др.) (рис. 5, правый верхний блок);

2) вводить технологические параметры пайки, включая мощность индуктора (мощность нагрева), расстояние от торца индуктора до точки нагрева, смещение индуктора относительно центра трубы, смещение пирометра относительно центра трубы, а также, параметры моделирования, включая начальную и конечную температуры и временной шаг модуляции (рис. 5, центральный блок);

3) запускать построение математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами, выполняя расчёты температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора (рис. 5, кнопки справа по центру);

4) просматривать результат моделирования в виде графиков зависимости температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки от времени (продолжительности пайки) и точки измерения температуры (рис. 5, графики в нижней части окна);

5) запускать моделирование процесса индукционной пайки в реальном времени с возможностью изменения технологических параметров модели в реальном времени (рис. 5, кнопки справа по центру);

б) и другие функции, которые можно обнаружить на рис. 5.

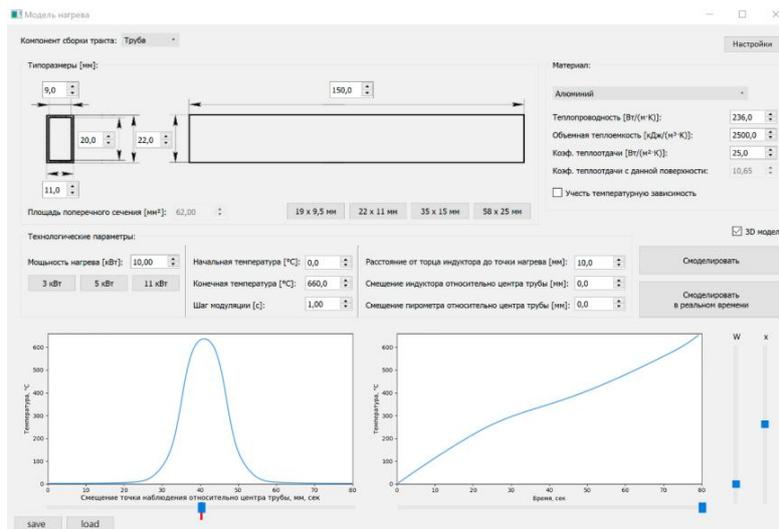


Рис. 5. Главный пользовательский интерфейс приложения

Разработанное программное средство имеет 4 внешних интерфейса для разных целей:

1) первый интерфейс представляет настольное приложение для математического и графического моделирования технологического процесса индукционной пайки и используется скорее в верификационных и научных целях, чем практических;

2) второй интерфейс предназначен для взаимодействия с глобальной системой автоматизированного управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов. Для неё приложение служит дополняющим модулем обучения с использованием построения математической модели технологического процесса индукционной пайки;

3) третий интерфейс служит линией экспорта и импорта данных через файловую систему в виде файлов .sld, содержащих данные о математической и графической модели технологического процесса индукционной пайки;

4) четвёртый интерфейс реализован в классе OutInterface.cpp и может использоваться для доступа к инструментам математического и графического моделирования технологического процесса индукционной пайки из других сторонних систем/приложений.

Последующее применение разработанного приложения заключается в интеграции с глобальной системой автоматизации технологического процесса индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов.

Верификация математической модели технологического процесса индукционной пайки и разработанного программного приложения. Проверим корректность выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильность её реализации в разработанном программном приложении. Для этого проведём сравнительное исследование моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах.

Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов. Структурно установка состоит из следующих компонентов (рис. 6): генератор индукционного нагрева (1), устройство согласования (2), набор индукторов с рабочими окнами (3), манипулятор-позиционер (4), индуктор (5), консоль управления (6), амперметр (7).

В качестве компьютера используется промышленный компьютер IPPC-9171G-07ВТО, имеющий компактное исполнение, защищенное от помех, позволяющее использовать для соединения с внешними устройствами ввода/вывода информации интерфейсную плату PCI-1710 и дополнительные разъемы RS-232. Наличие сенсорного экрана делает работу для оператора более удобной и наглядной. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

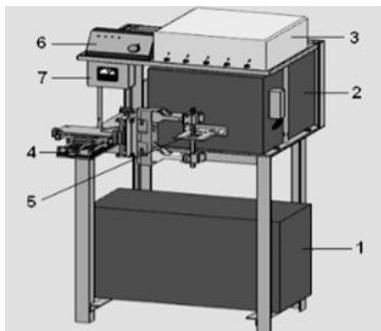


Рис. 6. Установка индукционной пайки

В качестве примера для опыта по сопоставлению результатов экспериментальных исследований и моделирования используем ту же тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта 22 x 11 мм (рис. 2). На рис. 7 представлены сводные данные для сравнения модельных графиков и графиков реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта при разных значениях мощности источника индукционного нагрева. Где синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 11 кВт; оранжевый график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 11 кВт; зеленый график – график волноводной (модель), мощность 5 кВт; красный график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 3 кВт; коричневый график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 3 кВт. Реальные экспериментальные данные об изменении температуры доступны только начиная от 200 °С поскольку имеющиеся пирометры имеют диапазон измеряемых температур 200-1800 градусов. Однако имеющихся данных вполне хватит чтобы корректно оценить качество моделирования технологического процесса индукционной пайки.

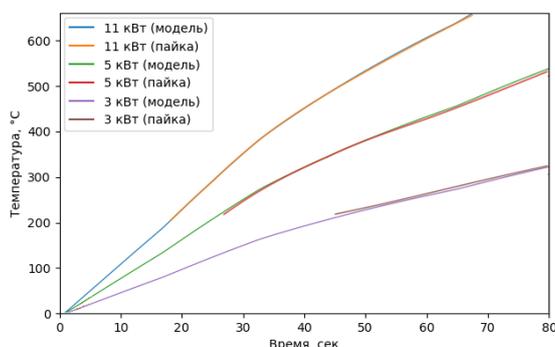


Рис. 7. Сравнительный график модели и реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта

В табл. 1 приведены значения среднеквадратичных отклонений результатов моделирования и реальных технологических процессов индукционной пайки волноводных трактов.

Таблица 1

Среднеквадратичные отклонения результатов моделирования для разных параметров индукционной пайки

Мощность источника нагрева, P	Среднеквадратичное отклонение
3 кВт	2,3 °С
5 кВт	2,1 °С
11 кВт	1,9 °С

Как видно из представленных выше графиков, а также данных об относительно низком значении среднеквадратичной ошибки, представленных в табл. 1, реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточно высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Результаты натуральных и модельных экспериментов показывают, что разработанный программный продукт, реализующий предложенные математические модели технологического процесса индукционной пайки, можно использовать для отработки разных режимов работы технологического процесса индукционной пайки тонкостенных волноводных трактов космических летательных аппаратов.

Заключение. В рамках данной работы была спроектирована и реализована функциональная автоматизированная подсистема математического моделирования технологического процесса индукционной пайки тонкостенных металлических волноводов космических летательных аппаратов. Полученный программный продукт является оптимальным решением для интеграции с системой, производящей управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в качестве генератора математических моделей процесса индукционной пайки для обучения алгоритма.

Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах.

Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильности её реализации в разработанном программном приложении.

В результате натуральных и модельных экспериментов установлено, что реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточной высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Целью дальнейших исследований может являться повышение точности автоматизированного моделирования технологического процесса индукционной пайки волноводных трактов путём внедрения интеллектуальных методов анализа данных и построения моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptanok V.D.* The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 155, No. 1. – P. 012007.
2. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Seregin Y.N., Emilova O.A.* A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 255, No. 1. – P. 012018.
3. *Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptanok V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N.* Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 173, No. 1. – P. 012023.
4. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.* Neural Network Modeling to Control Process of Induction Soldering // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2019. – P. 1-5.
5. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Petrenko V.E.* Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 1-5.
6. *Milov A.V. et al.* Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1118, No. 1. – P. 012037.
7. *Bukhtoyarov V.V. et al.* Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12, No. 2. – P. 59-66.
8. *Bocharova O.A. et al.* Induction heating simulation of the waveguide assembly elements // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1353, No. 1. – P. 012040.

9. *Murygin A.V. et al.* Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering // IOP Conference Series: Materials science and engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 173, No. 1. – P. 012026.
10. *Milov A., Tynchenko V., Petrenko V.* Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). –2019. – P. 1-6.
11. *Zhu T. et al.* The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model // 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering. – 2013. – P. 123-127.
12. *Pánek D. et al.* Reduced-order model based temperature control of induction brazing process // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). – 2019. – P. 1-4.
13. *Eftychiou M.A., Bergman T.L., Masada G.Y.* A detailed thermal model of the infrared reflow soldering process. – 1993.
14. *Щерба А.А. и др.* Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков // Технічна електродинаміка. – 2013.
15. *Клочкова Н.Н. и др.* Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 2, №. 1 (79).
16. *Вдовин К.Н., Егорова Л.Г., Гуков М.В.* Программное обеспечение для математического моделирования индукционного нагрева и закалки цилиндрических деталей // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – №. 2. – С. 40-45.
17. *Долгих И.Ю., Королев А.Н., Захаров В.М.* Математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве // Электротехника. Энергетика. Машиностроение. – 2014. – С. 85-88.
18. *Шарапова О.Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – №. 7.
19. *Черных И.В.* Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева // Научно-практический журнал Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – №. 2.
20. *Zeller U. et al.* Multiphysics simulation of induction soldering process // 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). – 2018. – P. 654-659.
21. *Papargyri L. et al.* Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review // Renewable Energy. – 2020. –Vol. 145. – P. 2387-2408.

REFERENCES

1. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptinok V.D.* The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol. 155, No. 1, pp. 012007.
2. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Seregin Y.N., Emilova O.A.* A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 255, No. 1, pp. 012018.
3. *Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptinok V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N.* Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 173, No. 1, pp. 012023.
4. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.* Neural Network Modeling to Control Process of Induction Soldering, *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1-5.
5. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Petrenko V.E.* Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints, *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2018, pp. 1-5.
6. *Milov A.V. et al.* Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1118, No. 1, pp. 012037.

7. Bukhtoyarov V.V. et al. Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance, *International Review of Automatic Control*, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 59-66.
8. Bocharova O.A. et al. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, Vol. 1353, No. 1, pp. 012040.
9. Murygin A.V. et al. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering, *IOP Conference Series: Materials science and engineering*. IOP Publishing, 2017, Vol. 173, No. 1, pp. 012026.
10. Milov A., Tynchenko V., Petrenko V. Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller, *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, pp. 1-6.
11. Zhu T. et al. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model, *2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering*, 2013, pp. 123-127.
12. Pánek D. et al. Reduced-order model based temperature control of induction brazing process, *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, 2019, pp. 1-4.
13. Eftychiou M.A., Bergman T.L., Masada G.Y. A detailed thermal model of the infrared reflow soldering process, 1993.
14. Shcherba A.A. i dr. Komp'yuternoe modelirovanie elektroteplovyykh protsessov i termomekhanicheskikh napryazheniy pri induktsionnom nagreve dvizhushchikhsya mednykh slitkov [Computer modeling of electro-heat processes and thermomechanical stresses during induction heating of moving copper ingots], *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2013.
15. Klochkova N.N. i dr. Modelirovanie induktsionnoy ustanovki spetsial'nogo naznacheniya sredstvami programmnoho paketa Flux [Modeling of the induction installation of special purpose by means of the FLUX software package], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2015, Vol. 2, No. 1 (79).
16. Vdovin K.N., Egorova L.G., Gukov M.V. Programmnoe obespechenie dlya matematicheskogo modelirovaniya induktsionnogo nagreva i zakalki tsilindricheskikh detaley [Software for mathematical modeling of induction heating and hardening cylindrical parts], *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2012, No. 2, pp. 40-45.
17. Dolgikh I.Yu., Korolev A.N., Zakharov V.M. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh i teplovyykh protsessov pri induktsionnom nagreve [Mathematical modeling of electromagnetic and thermal processes in induction heating], *Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie* [Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering], 2014, pp. 85-88.
18. Sharapova O.Yu. CHislennoe modelirovanie protsessa periodicheskogo induktsionnogo nagreva na baze konechno-elementnogo programmnoho paketa FLUX [Numerical modeling of a periodic induction heating process based on the finite elemental software package FLUX], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2010, No. 7.
19. Chernykh I.V. Paket ELCUT: modelirovanie ustroystv induktsionnogo nagreva [ELCUT package: modeling of induction heating devices], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh* [Scientific and practical magazine Exponenta Pro. Mathematics in applications], 2003, No. 2.
20. Zeller U. et al. Multiphysics simulation of induction soldering process, *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, 2018, pp. 654-659.
21. Papargyri L. et al. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review, *Renewable Energy*, 2020, Vol. 145, pp. 2387-2408.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.С. Тынченко.

Мараев Вячеслав Сергеевич – Сибирский федеральный университет; e-mail: slava9517538426@gmail.com; г. Красноярск, Россия; кафедра информатики; магистрант.

Marayev Vyacheslav Sergeevich – Siberian Federal University; e-mail: slava9517538426@gmail.com; Krasnoyarsk, Russia; the department of informatics; graduate student.

А.В. Боженюк, О.В. Косенко, М.В. Князева

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ*

Рассматривается задача оперативного планирования одно-предметного производства. Организация машиностроительного производства представляет собой сложный комплекс работ по определению многочисленных взаимосвязанных показателей, характеризующих деятельность предприятия. При этом предприятия такого типа имеют сложную иерархическую структуру. Также необходимо учитывать, что при планировании производственного процесса количество параметров велико и не все они могут быть точно определены, что отражается на эффективности деятельности предприятия. С целью решения задачи эффективного планирования были проанализированы критерии оптимальности для серийного одно-предметного производства. К одно-предметному производству относятся те, где проходят обработку детали одного наименования, то есть формируется поточная производственная линия. Следовательно, задача оптимизации производства состоит в том, чтобы распределить всю совокупность работ между станками и операторами, обслуживающими данный станок таким образом, чтобы плановое задание было выполнено в течение заданного времени и совокупные затраты на выполнение задания были минимальными. В статье рассмотрена задача назначения в условиях неопределенности, проведены экспериментальные расчеты и проведен анализ полученных результатов, обосновывающий применение предложенного аппарата нечетких множеств для решения задачи производственного планирования. Сделаны выводы, что в условиях неопределенности, когда нет точной или статистической информации, аппарат нечетких множеств позволяет провести анализ эффективности производственной деятельности при задании параметров, отражающих возможные значения системы. В таких случаях применение механизмов нечеткой логики в задачах принятия производственных решений позволит определить оптимальные или близкие к оптимальным решения.

Производственная задача; задача назначения; оптимизация; нечеткие параметры; максиминная свертка; нечеткое отношение.

A.V. Bozhenyuk, O.V. Kosenko, M.V. Knyazeva

OPTIMIZATION OF PROJECT SCHEDULING UNDER UNCERTAIN PARAMETERS

This article considers the problem of operational planning of one-subject production. The organization of machine-building production is a complex set of works to determine the inter-related indicators that characterize the activities of the enterprise. Enterprises of this type have a complex hierarchical structure. It is also necessary to take into account that when planning the production process, the number of parameters is large and not all of them can be accurately determined, which affects the efficiency of the enterprise. To solve the problem of effective planning, the optimality criteria for serial one-subject production were analyzed. One-subject production includes those where parts of the same name are processed, that is, a production line is formed. Consequently, the task of optimizing production is to distribute the entire set of work between the machines and operators servicing this machine in such a way that the planned task is completed within a given time and the total cost of completing the task is minimal. The article considers the problem of assignment under uncertainty, carried out experimental calculations and analyzed the results obtained, which justifies the use of the proposed apparatus of fuzzy sets for solving the problem of production planning. It is concluded that under conditions of uncertainty, when there is no exact or statistical information, the apparatus of fuzzy sets makes it possible to analyze the

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00197.

effectiveness of production activities when setting parameters that reflect the possible values of the system. In such cases, the use of fuzzy logic mechanisms in the problems of making production decisions will make it possible to determine optimal or close to optimal solutions.

Production problem; assignment task; optimization; fuzzy parameters; maximin convolution; fuzzy relation.

Введение. Объективной закономерностью развития производственных систем является усложнение функций управления, планирования и организации производственного процесса. Планирование на современном промышленном предприятии представляет собой сложный комплекс работ по определению многочисленных взаимосвязанных показателей, характеризующих деятельность предприятия. Современное промышленное предприятие имеет сложную иерархическую структуру. Предприятие, как правило, состоит из нескольких цехов, организованных по различным принципам. Цех, в свою очередь, также разделен на определенные участки и рабочие места. Наличие разнородных по характеру функционирования подразделений в значительной мере усложняет управление предприятием в части непосредственного управляющего воздействия, которое является прерогативой оперативно-календарного управления.

Оперативно-календарное планирование как составная часть внутрипроизводственного планирования на промышленном предприятии представляет собой своеобразную область управленческой работы. Это обуславливается тем, что оперативное планирование относится к этапу планирования, непосредственно предшествующему исполнительской деятельности. Вторая особенность заключается в том, что в нем доминирующую роль играют вопросы развертывания плана выполнения работ во времени, то есть составления календарных планов-графиков. Планирование эффективного производства направлено прежде всего на сокращение затрат различного характера: затраты из-за простоев, затраты из-за выпуска бракованной продукции, затраты из-за лишних этапов обработки, затраты связанные с несоответствием квалификации работников своим трудовым обязанностям [1, 2]. В некоторых источниках [2–4] к производственным потерям относят как нереализованный творческий потенциал сотрудников, так и перегрузку рабочих, сотрудников или мощностей при работе с повышенной интенсивностью. Отмечается, что устранение потерь и оптимизация процессов производства должны осуществляться не от случая к случаю, а на постоянной основе [2, 5]. То есть принятие решений при оптимизации производства должно быть автоматизировано и основываться на соответствующих математических методах. Эксперты отмечают, что уменьшение времени переналадки оборудования и увеличение гибкости производства позволяют быстро создавать небольшие партии товара и конкурировать с масштабным производством аналогичных товаров [5–7]. При этом необходимо учитывать большое количество параметров, которые при планировании производственного процесса не могут быть точно определены и при этом влияют на эффективность деятельности предприятия [8, 9].

Во втором разделе этой статьи рассматривается задача планирования однопредметного производства, определяются критерии оценки параметров задачи с помощью операции свертки нечетких отношений. В третьем разделе рассмотрена практическая задача назначения (то есть закрепления операторов за определенными станками) в условиях неопределенности, проведены экспериментальные расчеты и проведен анализ полученных результатов, обосновывающий применение предложенного аппарата нечетких множеств для решения задачи назначения. В последнем разделе рассматриваются выводы и будущие направления.

Определение задачи однопредметного производства в условиях неопределенности. К одному из распространенных типов производственных подразделений относятся участки, где проходят обработку детали одного наименования [10]. Формирование однопредметного участка массового производства целесообразно в тех случаях, когда потребность в единицу времени деталей одного вида весьма высока и превышает производительность обрабатывающих их станков. Как правило, в этом случае формируется поточная линия обработки деталей. Поточный метод производства – одна из прогрессивных форм организации производственного процесса. Существенный фактор его эффективности заключается в низком объеме незавершенного производства. В наибольшей мере это проявляется в условиях синхронизированного потока, так как в этом случае не создается межоперационного задела, обусловленного разностью производительностей обработки деталей на смежных рабочих местах. Однако в производственной практике нередки случаи построения поточных линий с различными производительностями по различным деталям, т.е. проточных линий. Такой асинхронный поток нуждается в плане, указывающем особенности работы на каждом рабочем месте [10, 11]. При построении такого плана необходимо учитывать накопление и расходование межоперационного задела, возникающего вследствие разности производительности станков и квалификацию операторов, обслуживающих эти станки. Эти основные факторы формирования календарного плана работы проточной линии должны приниматься во внимание при анализе, разложении и численном решении моделей оперативно-календарного планирования однопредметного участка.

В общем случае задача оптимизации производства состоит в том, чтобы распределить всю совокупность работ между станками и операторами, обслуживающими данный станок таким образом, чтобы плановое задание было выполнено в течение заданного времени и совокупные затраты на выполнение задания были минимальными. Для задачи серийного однопредметного производства критерий оптимальности определяется, как и в общей задаче оптимизации производства – минимизация затрат при выполнении производственной задачи [7, 9].

Определим исходные данные. Пусть имеется однопредметный участок, где I – множество индексов видов деталей, так как мы рассматриваем однопредметный производственный участок, то данное множество определим как $I=\{1\}$. Для участков массового производства характерна обработка деталей узкоспециализированными станками, за которыми закрепляется единственная деталяоперация. Следовательно, множество $A(k)$ будет задано множеством пар $\{(i, u)\}$ – деталяопераций, выполняемых на k -ом станке. Для поставленной задачи однопредметного производства множество $A(k)$ будет состоять из единственной пары $\{(1, u)\}$.

Входные параметры производственной задачи:

$a(k)$ – производительность k -го станка при выполнении u -й операции,

T – плановый период производства детали.

Неизвестные параметры задачи:

$t(k, p)$ – длительность p -ой обработки детали на k -ом станке;

$x(k, p)$ – длительность перерыва после окончания p -ой обработки k -ым станком;

$X(k, p)$ – момент начала p -ой обработки k -ым станком;

$Y(k, p)$ – момент окончания p -ой обработки k -ым станком;

$y(m)$ – длительность простоя m -го оператора.

$\eta(k, p; m)$ – коэффициент передачи деталей от k -го станка к m -му оператору, то есть оценка возможности передачи деталей прошедших p -ю обработку на k -ом станке и отправляемая на следующую операцию для обработки m -му оператору.

В данной постановке необходимо определиться с двумя критериями: есть ли возможность выполнения надлежащего качества p -ой операции на k -ом станке с установленными допусками и есть ли возможность выполнения у m -го оператора данной детали операции на требуемом уровне.

Также необходимо отметить условия неотрицательности параметров задачи: $t, x, y \geq 0$.

Определяющим условием производственной задачи является условие выполнения программы в течение заданного календарного периода [11]:

$$x(k, 0) + \sum_p [t(k, p) + x(k, p)] = T(k) \leq T$$

$$\sum_{(k,p)} \sum_r t(k, p) + y(m) = T(m) \leq T.$$

В качестве критерия оптимальности определим функцию обеспечивающую минимум затрат (ресурсных, финансовых, временных) при назначении операторов для выполнения соответствующих детали операций на соответствующих станках:

$$F(t(k,p), x(k,p), y(m)) \rightarrow \min.$$

Вполне ясно, что выполняемые при выборе стратегии назначения операторов для выполнения конкретных задач для работы на определенном оборудовании существуют методы, которые широко освещены в литературе [11–14] и их применение не вызывает затруднений. Но ситуация коренным образом меняется если параметры, задающие состояние внешней среды и производственного процесса не могут быть оценены с надлежащей точностью и при этом необходимо одновременно решить как минимум три задачи: эффективное закрепление детали операций за определенными станками, закрепление операторов за деталями операциями и определение задачи оптимального назначения операторов для выполнения соответствующих детали операций на соответствующих станках. Даже при условии однопредметного производственного участка существует проблема нахождения оптимального решения при согласовании различных желаемых критериев. Так, например, у операторов, которые обслуживают тот или иной станок могут быть различные квалификации, различное время работы, различный процент бракованной продукции. Так и у станков могут быть различные критерии, которые влияют на создание плана работы предприятия. Все это влияет на итоговое значение затрат при производстве продукции. Так как критериев, необходимых для соблюдения много, то принять решение о выборе альтернативного решения обеспечивающего эффективность деятельности промышленного предприятия в условиях неопределенности достаточно сложно [15–17].

Рассмотрим решение задачи закрепления операторов за определенными станками с помощью методов нечеткой логики, а именно с помощью использования сверток нечетких отношений.

Определение. Нечетким отношением, заданным на множествах X_1, X_2, \dots, X_k называется некоторое фиксированное нечеткое подмножество декартова произведения этих множеств. То есть, $Q = \{(x_1, x_2, \dots, x_k), \mu_Q(x_1, x_2, \dots, x_k)\}$, где $\mu_Q(x_1, x_2, \dots, x_k)$ - функция принадлежности нечеткого числа, которая определяется как отображение $\mu_Q: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_k \rightarrow [0,1]$ [18, 19].

Через $\langle s_1, s_2, \dots, s_k \rangle$ обозначим кортеж из k элементов (по количеству станков), $\langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$ - (по количеству операторов), $\langle u_1, u_2, \dots, u_c \rangle$ - кортеж из c элементов (по количеству характеристик необходимых для работы на станке), каждый их которых выбирается из своего универсума $s_1 \in S_1, s_2 \in S_2, \dots, s_k \in S_k, u_1 \in U_1, u_2 \in U_2, \dots, u_c \in U_c$.

Для решения поставленной задачи определим композицию двух нечетких отношений, то есть определим максиминную свертку нечетких отношений, которая определится следующим образом [20, 21]:

$$\mu_{Q \otimes R}((x_1, x_k)) = \max \left\{ \min \{ \mu_Q((x_i, x_j)), \mu_R((x_j, x_k)) \} \right\}. \quad (1)$$

Существует альтернативная операция, позволяющая определить композицию нечетких множеств, так называемая (*max*-*)-композиция нечетких отношений. При этом функция принадлежности определится следующим образом:

$$\mu_{Q * R}((x_1, x_k)) = \max \{ \mu_Q((x_i, x_j)) * \mu_R((x_j, x_k)) \}. \quad (2)$$

Операция максиминной свертки и (*max* -*)-операция позволят получить информацию о степени соответствия оператора для работы на определенном станке.

Минимаксная операция над нечеткими отношениями определится следующим образом:

$$\mu_{Q \oplus R}((x_1, x_k)) = \min \left\{ \max \{ \mu_Q((x_i, x_j)), \mu_R((x_j, x_k)) \} \right\}. \quad (3)$$

Операция минимаксной свертки позволит получить информацию о нежелательности закрепления данного оператора для работы на данном станке.

Практическое применение операции нечеткой свертки для решения производственной задачи. Пусть $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множество станков, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – множество операторов, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_c\}$ – множество параметров-характеристик, необходимых для работы на *i*-ом станке и/или присущих операторам. Пусть экспертным путем определены и представлены в табл. 1 и табл. 2 значения соответствующих функций принадлежности.

Таблица 1

Задание функции принадлежности соответствия параметров-характеристик станкам

	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3	Параметр 4	Параметр 5
Станок 1	0,8	0,4	0,9	0,6	0,9
Станок 2	0,3	0,2	1	0,3	1
Станок 3	0,7	0,6	0,3	0,5	0,8
Станок 4	0,4	0,8	0,5	0,7	0,7

Таблица 2

Задание функций принадлежностей соответствия параметров-характеристик операторам

	Оператор 1	Оператор 2	Оператор 3
Параметр 1	0,9	0,9	0,6
Параметр 2	0,8	0,6	0,4
Параметр 3	0,3	0,6	0,9
Параметр 4	0,8	0,6	0,7
Параметр 5	0,7	0,4	0,8

Применяя операцию максиминной свертки (1) получим следующие результаты функций принадлежности, по которым можно судить о целесообразности назначения Оператора 1 для работы на станках.

$$\mu_{S \otimes Y}(\langle s_1, y_1 \rangle) = \max \left\{ \begin{array}{l} \min\{\mu_S(\langle s_1, u_1 \rangle), \mu_Y(\langle u_1, y_1 \rangle)\} = 0,8 \\ \min\{\mu_S(\langle s_1, u_2 \rangle), \mu_Y(\langle u_2, y_1 \rangle)\} = 0,4 \\ \min\{\mu_S(\langle s_1, u_3 \rangle), \mu_Y(\langle u_3, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_1, u_4 \rangle), \mu_Y(\langle u_4, y_1 \rangle)\} = 0,6 \\ \min\{\mu_S(\langle s_1, u_5 \rangle), \mu_Y(\langle u_5, y_1 \rangle)\} = 0,7 \end{array} \right\} = 0,8$$

$$\mu_{S \otimes Y}(\langle s_2, y_1 \rangle) = \max \left\{ \begin{array}{l} \min\{\mu_S(\langle s_2, u_1 \rangle), \mu_Y(\langle u_1, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_2, u_2 \rangle), \mu_Y(\langle u_2, y_1 \rangle)\} = 0,2 \\ \min\{\mu_S(\langle s_2, u_3 \rangle), \mu_Y(\langle u_3, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_2, u_4 \rangle), \mu_Y(\langle u_4, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_2, u_5 \rangle), \mu_Y(\langle u_5, y_1 \rangle)\} = 0,7 \end{array} \right\} = 0,7$$

$$\mu_{S \otimes Y}(\langle s_3, y_1 \rangle) = \max \left\{ \begin{array}{l} \min\{\mu_S(\langle s_3, u_1 \rangle), \mu_Y(\langle u_1, y_1 \rangle)\} = 0,7 \\ \min\{\mu_S(\langle s_3, u_2 \rangle), \mu_Y(\langle u_2, y_1 \rangle)\} = 0,6 \\ \min\{\mu_S(\langle s_3, u_3 \rangle), \mu_Y(\langle u_3, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_3, u_4 \rangle), \mu_Y(\langle u_4, y_1 \rangle)\} = 0,5 \\ \min\{\mu_S(\langle s_3, u_5 \rangle), \mu_Y(\langle u_5, y_1 \rangle)\} = 0,7 \end{array} \right\} = 0,7$$

$$\mu_{S \otimes Y}(\langle s_4, y_1 \rangle) = \max \left\{ \begin{array}{l} \min\{\mu_S(\langle s_4, u_1 \rangle), \mu_Y(\langle u_1, y_1 \rangle)\} = 0,4 \\ \min\{\mu_S(\langle s_4, u_2 \rangle), \mu_Y(\langle u_2, y_1 \rangle)\} = 0,8 \\ \min\{\mu_S(\langle s_4, u_3 \rangle), \mu_Y(\langle u_3, y_1 \rangle)\} = 0,3 \\ \min\{\mu_S(\langle s_4, u_4 \rangle), \mu_Y(\langle u_4, y_1 \rangle)\} = 0,5 \\ \min\{\mu_S(\langle s_4, u_5 \rangle), \mu_Y(\langle u_5, y_1 \rangle)\} = 0,7 \end{array} \right\} = 0,8$$

В табл. 3 приведены значения функций принадлежности свертки рассматриваемых нечетких отношений.

Таблица 3

Значения функции принадлежности нечетких отношений

	Оператор 1	Оператор 2	Оператор 3
Станок 1	0,8	0,8	0,7
Станок 2	0,7	0,6	0,7
Станок 3	0,7	0,7	0,8
Станок 4	0,8	0,6	0,7

Анализ табл. 3 показывает, что при планировании производственной деятельности целесообразно рекомендовать закрепления операторов для работы на определенных станках на основе максимальных значений функции принадлежности свертки рассматриваемых нечетких множеств.

В табл. 4 приведены результаты согласно операции над нечеткими отношениями (\max -*) (2).

Таблица 4

	Оператор 1	Оператор 2	Оператор 3
Станок 1	0,72	0,63	0,81
Станок 2	0,7	0,6	0,9
Станок 3	0,63	0,63	0,64
Станок 4	0,64	0,56	0,49

Анализ результатов операции над нечеткими отношениями (\max^*) позволяет сделать выводы на основе максимальных значений функции принадлежности свертки рассматриваемых нечетких отношений.

Следуя принципам прикладного системного анализа, используя различные модели свертки нечетких отношений, были получены схожие результаты. Данный факт может свидетельствовать о закономерности применения аппарата свертки нечетких множеств при решении задачи планирования производственных операций.

Для более детального анализа соответствия закрепления операторов для работы на конкретных станках применим минимаксная операция над нечеткими отношениями (3), которая позволит получить дополнительную информацию о нежелательности закрепления данного оператора для работы на данном станке. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты вычисления свертки

	Оператор 1	Оператор 2	Оператор 3
Станок 1	0,8	0,6	0,4
Станок 2	0,8	0,6	0,4
Станок 3	0,3	0,6	0,5
Станок 4	0,5	0,6	0,6

Анализ табл. 5 позволяет принять решение, если значения функций принадлежности максиминной свертки и (\max^*)-свертки дают практически равные значения функций принадлежности. Так, например, функции принадлежности, определяющие закрепление за станками для Оператора 1 практически равны, но анализ операции минимаксной свертки свидетельствует о целесообразном закреплении Оператора 1 за Станком 3 или Станком 4.

Заключение. При принятии решений при планировании и организации производства в условиях неопределенности, когда нет устойчивой и достаточной статистической информации, именно аппарат нечетких множеств позволяет провести анализ эффективности производственной деятельности при задании параметров, отражающих возможные значения системы. В таких случаях применение механизмов нечеткой логики в задачах принятия производственных решений позволит определить оптимальное или близкое к оптимальному решение, в том числе и в задачах закрепления операторов за определенным промышленным оборудованием с учетом многокритериальности и большого числа входных нечетких параметров.

В качестве недостатков предложенного применения методов нечеткого анализа при решении производственных задач можно отметить определенный риск в субъективности при определении функций принадлежности при оценке того или иного критерия. Но данная задача может быть отрегулирована соответствующими методами оценки экспертной информации.

В качестве преимуществ данного подхода можно отметить, то, что он позволяет системно оценивать решение задачи, так как свертка позволяет учитывать несколько важных критериев при решении поставленной задачи, при этом качественные параметры могут быть переведены в количественные. Также стоит отметить, что данный подход позволит решить задачу производственного планирования при отсутствии статистических данных.

Поставленная задача была решена для однопредметного производственного планирования. В дальнейшем планируется рассмотреть задачу организации многопредметного производства, соответствующая математическая постановка которой позволит выявить определенные закономерности и специфику каждой из задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lödning H.* Handbook of Manufacturing Control. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 303 p.
2. *Mayer J.H., Winter R., Mohr T.* Situational management support systems, *Business & Information Systems Engineering*, 2021, 4, pp. 331-345.
3. *Ivert L.K., Jonsson P.* The potential benefits of advanced planning and scheduling systems in sales and operations planning, *Indus. Manage. Data Syst.*, 2010, 110 (5), pp. 659-681.
4. *Grimson J.A., Pyke D.F.* Sales and operations planning: an exploratory study and framework, *The International Journal of Logistics Management*, 2007, 18 (3), pp. 322-346.
5. *Kolinski A., Śliwczyński B.* IT support of production efficiency analysis in ecological aspect. In: *Golinska, P., Kawa, A.* (eds.) Technology Management for Sustainable Production and Logistics. Springer Verlag, Berlin, 2015, pp. 205-219.
6. *Olhager J., Johansson P.* Linking long-term capacity management for manufacturing and service operations, *Journal of Engineering and Technology Management*, 2012, 29 (1), pp. 22-33.
7. *Adamczak M., Domański R., Hadaś Ł., Cyplik P.* The integration between production-logistics system and its task environment chosen aspects, *IFAC-PapersOnline*, 2016, 49 (12), pp. 656-661.
8. *Hentschel B., Domański R., Adamczak M., Cyplik P., Hadaś Ł., Kupczyk M., Pruska Z.* Ranking of integration factors within supply chains of forward and backward types—recommendations from researches, *Logforum*, 2015, 11 (2), pp. 161-169.
9. *Berghman L., Leus R., Spieksma F.* Optimal solutions for a dock assignment problem with trailer transportation, *Annals of Operations Research*, 2014, 213, pp. 3-25.
10. *Van der Aalst W.M.P., Adriansyah A., Alves de Medeiros A.K.* Process Mining Manifesto, *Lecture Notes in Business Information Processing*, 2012, 99, pp. 169-194.
11. *Khandelwal A.* A modified approach for assignment method, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2014, 3 (2), pp. 136-138.
12. *Ahmed A., Ahmad A.* A new method for finding an optimal solution of assignment problem, *International Journal of Modern Mathematical Sciences*, 2014, 12 (1), pp. 10-15.
13. *Thirupathi A., Iranian D.* An Innovative Method for Finding Optimal Solution to Assignment problems, *IJIRSET*, 2015, 4 (8), pp. 7366-7370.
14. *Ghadle K.P., Ingle S.M., Hamoud A.A.* Optimal solution of fuzzy transshipment problem using generalized hexagonal fuzzy numbers, *International Journal of Engineering and Technology (IAE)*, 2018, 7 (4.10 Special Issue 10), pp. 558-561.
15. *Kumar A., Gupta A.* Assignment and Travelling Salesman Problems with Coefficients as LR Fuzzy Parameters, *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2012, 10 (3), pp. 155-170.
16. *Kumar A., Gupta A., Kaur A.* Method for solving fully fuzzy assignment problems using triangular fuzzy numbers, *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2009, 3 (7), pp. 1889-1892.
17. *Dehghan M., Hashemi B., Ghatee M.* Computational methods for solving fully fuzzy linear systems, *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 179, pp. 328-343.
18. *Kacprzyk J.* Group decision making with a fuzzy linguistic majority, *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 18 (2), pp. 105-118.
19. *Wasserstein R., Lazar N.* The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose, *The American Statistician*, 2016, 70 (2), pp. 129-133.
20. *Kosenko O., Bozhenyuk A., Belyakov S., Knyazeva M.* Optimization of Spatial-Time Planning Resource Allocation Under Uncertainty, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2021, 1197, pp. 1475-1482.
21. *Kosenko O., Bozhenyuk A., Knyazeva M.* The Task of Optimizing Production Planning with Fuzzy Parameters, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, 307, pp. 546-553.

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

Боженюк Александр Витальевич – Южный федеральный университет; e-mail: avb002@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371743; д.т.н.; профессор.

Косенко Олеся Валентиновна – e-mail: ovkosenko@sfedu.ru; тел.: 88634371689; к.т.н.; доцент.

Князева Маргарита Владимировна – e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; тел.: 88634371743; к.т.н.; доцент.

Bozhenyuk Aleksander Vitalievich – Southern Federal University; e-mail: avb002@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371743; dr. of eng. sc.; professor.

Kosenko Olesya Valentinovna – e-mail: ovkosenko@sfedu.ru; phone: +78634371689; cand. of eng. sc.; associate professor.

Knyazeva Margarita Vladimirovna – e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; phone: +78634371743; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.5.015.44

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-65-78

**А.А. Иноземцев, Н.Г. Ламанова, А.С. Плешивых, И.Н. Грибков,
А.Н. Саженков**

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО
ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ
ОПТИМАЛЬНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ**

Предлагается аналитическое резервирование в системе автоматического управления турбореактивного двухконтурного двигателя (САУ ТРДД) на основе оптимальных наблюдателей. Настоящая статья основана на ранее полученных результатах в предшествующих авторских работах и является обобщением, и анализом этих результатов с целью разработки методики повышения отказоустойчивости САУ ТРДД. Этот метод основан на использовании оптимальных наблюдателей: фильтра Калмана и фильтра Язвинского, согласованных с математической моделью САУ ТРДД. Анализ математической модели САУ проводился по методу наименьших квадратов в движущемся окне. Точность идентификации математической модели и требуемое время запаздывания обеспечиваются оптимизацией ширины движущегося окна. Оцениваемые при помощи оптимальных наблюдателей вектор выхода САУ ТРДД включает следующие параметры: частота вращения ротора компрессора низкого давления n_n , частота вращения ротора компрессора высокого давления n_h , давление воздуха за компрессором высокого давления P_k , температура газа за турбиной низкого давления T_T . При моделировании фильтра Калмана предварительно проводился корреляционный анализ входных сигналов. Приводится обоснование преимущества адаптивного фильтра Язвинского по сравнению с фильтром Калмана. Представлены результаты математического моделирования алгоритмического метода резервирования канала измерения САУ ТРДД по данным летных испытаний двухконтурного двигателя типа ПС-90А в составе магистрального узкофюзеляжного самолета ТУ-214 как на стационарном, так и переходном режимах. Проведен статистический анализ ошибок оценивания вектора выхода САУ ТРДД на основе фильтра Калмана и Язвинского. Показано, что предлагаемый алгоритм аналитического резервирования обеспечивает выполнение требований по точности и устойчивости оценок вектора выхода САУ ТРДД при использовании фильтра Язвинского и может быть рекомендован для использования в перспективных САУ ТРДД. По результатам анализа предлагаемого метода резервирования сформировано направление дальнейших исследований.

Авиационный двигатель; резервирование; математическая модель; отказоустойчивость; оптимальный наблюдатель; фильтр Калмана; фильтр Язвинского; переходный режим; метод наименьших квадратов.

A.A. Inozemtsev, N.G. Lamanova, A.S. Pleshivykh, I.N. Gribkov, A.N. Sazhenkov

ANALYTICAL REDUNDANCY IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN AIRCRAFT TURBOJET BYPASS ENGINE BASED ON OPTIMAL OBSERVERS

An analytical redundancy in the automatic control system of a bypass turbojet engine (ACS turbofan engine) based on optimal observers is proposed. This article is based on previously obtained results in previous author's works and is a generalization and analysis of these results in order to develop a methodology for improving the fault tolerance of ACS turbofan engines. This method is based on the use of optimal observers: the Kalman filter and the Yazvinsky filter, consistent with the mathematical model of the ACS turbofan engine. The analysis of the mathematical model of the ACS was carried out using the least squares method in a moving window. The accuracy of identification of the mathematical model and the required delay time are ensured by optimizing the width of the moving window. Estimated with the help of optimal observers, the output vector of the ACS turbofan engine includes the following parameters: the rotor speed of the low-pressure compressor rotor n_6 , the rotor speed of the high-pressure compressor n_8 , the air pressure behind the high-pressure compressor P_8 , the gas temperature behind the low-pressure turbine T_7 . When modeling the Kalman filter, a correlation analysis of the input signals was preliminarily carried out. The rationale for the advantage of the adaptive Yazvinsky filter compared to the Kalman filter is given. The results of mathematical modeling of the algorithmic method of reserving the measurement channel of the ACS turbofan engine based on the data of flight tests of a bypass engine of the PS-90A type as part of the main narrow-body aircraft TU-214 both in stationary and transient modes are presented. Statistical analysis of errors in estimation of the output vector of ACS turbofan engines based on the Kalman and Yazvinsky filter has been carried out. It is shown that the proposed analytical redundancy algorithm ensures the fulfillment of the requirements for the accuracy and stability of estimates of the output vector of ACS turbofan engines when using the Yazvinsky filter and can be recommended for use in advanced ACS turbofan engines. Based on the results proposed redundancy method, a direction for further research has been formed.

Aircraft engine; backing-up; mathematical model; fault tolerance; optimal observer; Kalman filter; Jazvinsky filter; transient mode; least squares method.

Введение. При создании сложных высокотехнологичных динамических систем, таких как САУ ТРДД, возникает необходимость в обеспечении их устойчивости к различного рода нарушениям и отказам. Под устойчивостью к отказам понимается способность динамических систем выполнять свои функции и после выявления отказа при допущении приемлемого снижения качества управления.

Усложнение современных САУ способствует увеличению вероятности отказов в канале измерения параметров ТРДД, что приводит к проблемам при решении задач управления. Поэтому задача обеспечения отказоустойчивости САУ на различных режимах функционирования становится приоритетной.

Для парирования отказов в САУ ТРДД необходима информационная избыточность, которая создается при помощи аппаратного или аналитического резервирования. При аппаратном резервировании неисправные датчики канала измерения заменяют дублирующим каналом. При аналитическом резервировании информационная избыточность создается на основе алгоритмических методов. В этом случае показания отказавших датчиков заменяют расчетными оценками, вычисленными по показаниям исправных датчиков и математической модели объекта управления (ОУ).

Отказоустойчивость САУ авиационных двигателей традиционно обеспечивается при помощи аппаратного резервирования. Так, например, электронная САУ двигателя ПС-90А – двухканальная. В системе встроенного контроля электронной части САУ предусмотрен допусковый контроль, перекрестный контроль и темповый контроль каналов измерений параметров САУ ТРДД. В случае возникновения двойного отказа каналов измерений или отказа по перекрестному контролю кана-

лов измерений основных параметров ТРДД в разных каналах САУ происходит отключение обоих управляющих каналов электронной части и переход на резервное гидромеханическое управление [1, с. 209]. Увеличение мощности современных вычислительных устройств способствовало развитию алгоритмических методов резервирования, требующих значительных вычислительных затрат. Аналитическое резервирование в САУ ТРДД может служить дополнительным источником информации о состоянии ОУ, повысить надежность процесса идентификации неисправности одного из двух каналов измерения и, следовательно, предотвратить отключение электронной системы управления.

При аналитическом резервировании в качестве дублирующих измерителей используют оптимальные наблюдатели. Таким наблюдателем является оптимальный фильтр Калмана (ОФК) [2, 3], который позволяет вычислять оптимальные оценки вектора состояния и вектора выхода САУ ТРДД в реальном времени на основе математической модели САУ, согласованной с ОФК, измерений параметров состояния, а также вероятностных характеристик сигналов датчиков и возмущающих воздействий [4].

САУ ТРДД функционирует в условиях воздействия внешних помех (системных шумов), которые изменяются во времени сложным образом и не контролируются, что не позволяет статистически достоверно оценить их вероятностные характеристики в реальном времени. Неточность определения этих характеристик может вызвать расхожимость фильтра, которая приводит к увеличению ошибок оценивания вектора состояния ОУ [5].

В отличие от системных шумов результаты анализа измерительных шумов более достоверны, так как ошибки измерителей, как правило, известны и более стабильны.

Использование ОФК для повышения отказоустойчивости САУ ТРДД предполагает решение ряда задач, которые рассматривались как самостоятельные в работах [4, 6, 7]. К ним относятся:

- ◆ идентификация коэффициентов математической модели САУ ТРДД в реальном времени;
- ◆ согласование оптимального наблюдателя с математической моделью САУ ТРДД и его моделирование на различных режимах работы двигателя в условиях полета при нормальном функционировании САУ ТРДД и при отказах датчиков канала измерения;
- ◆ определение ковариационной матрицы шума возмущения (системы) в реальном времени.

Полученные результаты позволили разработать общую методику повышения отказоустойчивости САУ ТРДД.

Идентификация математической модели САУ ТРДД. Функционирование САУ ТРДД в малой окрестности установившегося движения описывается линейной, дискретной, стохастической моделью [8]

$$\begin{cases} x(k+1)=\Phi(k)x(k)+\Psi(k)u(k)+\Phi_0(k)+w(k) \\ z(k+1)=H(k+1)x(k+1)+D(k+1)u(k+1)+H_0(k+1)+v(k+1) \end{cases}, \quad (1)$$

где $x(k)$ – вектор состояния, $x(k)=[n_\theta(k) \ n_k(k)]^T$; $u(k)$ – вектор управляющего воздействия, $u(k)=[G_T(k) \ \varphi_{\text{вн}}(k)]^T$; $z(k)$ – вектор измерений (выхода), $z(k)=[z_1(k) \ ; \ z_2(k)]^T$; $z_1(k)$ – вектор прямых измерений вектора состояния, $z_1(k)=[n_\theta^u(k) \ n_k^u(k)]^T$; $z_2(k)$ – вектор косвенных измерений, $z_2(k)=[P_K(k) \ T_T(k)]^T$; $w(k)$ – вектор шума возмущения $w(k)=[w_1(k) \ w_2(k)]^T$; $v(k)$ – вектор шума измерения $v(k)=[v_1(k) \ v_2(k) \ v_3(k) \ v_4(k)]^T$; $n_\theta(k)$, $n_k(k)$ – частота вращения ротора низкого и высокого давления; $G_T(k)$ – расход топлива в камере сгорания; $\varphi_{\text{вн}}(k)$ – угол поворота входных направляющих аппаратов;

$P_K(k)$ – давление газа за компрессором; $T_T(k)$ – температура газа за турбиной низкого давления; Φ, Ψ, Φ_0 – переходные матрицы коэффициентов динамической модели, $\Phi = \{\varphi_{ij} \ i, j = 1, 2\}$, $\Psi = \{\psi_{ij} \ i, j = 1, 2\}$, $\Phi_0 = \{\varphi_{0i} \ i = 1, 2\}$; H, D, H_0 – матрицы коэффициентов модели измерений, $H = [H_1 \ H_2]^T$, $D = [D_1 \ D_2]^T$, $H_1 = D_1 = 0$, $H_2 = \{h_{ij} \ i, j = 1, 2\}$; $D_2 = \{d_{ij} \ i, j = 1, 2\}$; $H_0 = [H_{01} \ H_{02}]^T$; $H_{01} = 0$, $H_{02} = \{h_{0i} \ i = 1, 2\}$.

Полагается, что $x(k), z(k), u(k)$ – гауссовские процессы; начальное состояние $x(0)$; $M\{x(0)\} = \bar{x}$; $M\{x(0)x^T(0)\} = P(0/0)$; $w(k), v(k)$ – центрированные гауссовские процессы; $M\{w(k)\} = M\{v(k)\} = 0$; ковариационные матрицы системных и измерительных шумов $\text{cov}\{w(k)\} = M\{w(k)w^T(k)\} = Q(k)$, $\text{cov}\{v(k)\} = M\{v(k)v^T(k)\} = R(k)$ – дисперсионные матрицы; $\text{diag}R = [\sigma_{v_1}^2 \ \dots \ \sigma_{v_m}^2]$; $\text{diag}Q = [\sigma_{w_1}^2 \ \dots \ \sigma_{w_p}^2]$.

Каждое из уравнений модели (1) можно записать в матричном виде:

$$y(k) = X(k)\varepsilon(k) + e(k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $y(k)$ – n -вектор отклика, состоящий из измеренных значений сигнала выхода; $X(k)$ – матрица регрессоров размера (n, m) , состоящая из измеренных значений сигналов входа; $\varepsilon(k)$ – вектор коэффициентов размера $(m+1)$; $e(k)$ – n -вектор ошибок (помехи); n – число измеренных значений сигналов; m – количество сигналов входа;

Для определения оптимальных оценок коэффициентов модели (2) в реальном времени используется матричный алгоритм метода наименьших квадратов (МНК) в движущемся окне [6].

$$\hat{\theta}(k) = [X^T(k)X(k)]^{-1} X^T(k)y(k), \quad k = 1, s,$$

где $\hat{\theta}(k) = [\hat{\theta}_0(k) \ \hat{\theta}_1(k) \ \dots \ \hat{\theta}_m(k)]$; s – ширина движущегося окна.

Оценки коэффициентов в МНК определяются из условия минимума суммы квадратов ошибки оценки отклика [9, 10].

$$\tilde{y}^T(k)\tilde{y}(k) \rightarrow \min,$$

где $\tilde{y}(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ – вектор ошибок оценки отклика; $\hat{y}(k)$ – МНК-оценка сигнала выхода.

Следует отметить, что МНК исходит из ряда ограничительных условий [10], при которых МНК-оценки – это линейные несмещенные оценки с минимальной дисперсией.

С целью повышения точности идентификации модель (2) центрируется:

$$\overset{\circ}{y}(k) = \overset{\circ}{X}(k)\overset{\circ}{\varepsilon}(k) + e(k), \quad k = 1, s,$$

где $\overset{\circ}{y}(k)$, $\overset{\circ}{X}(k)$ – центрированные вектор отклика и матрица регрессоров.

В этом случае алгоритм МНК принимает вид:

$$\hat{\theta}(k) = [\overset{\circ}{X}^T(k)\overset{\circ}{X}(k)]^{-1} \overset{\circ}{X}^T(k)\overset{\circ}{y}(k), \quad k = 1, s, \quad (3)$$

где $\overset{\circ}{\theta}^T(k) = [\hat{\theta}_0(k) \ \dots \ \hat{\theta}_m(k)]$.

Оценка коэффициента постоянного смещения определяется из уравнения средних:

$$\hat{\theta}_0(k) = \bar{y}(k) - \sum_{j=1}^m \hat{\theta}_j(k)\bar{x}_j(k), \quad k = 1, s, \quad (4)$$

где $\bar{y}(k)$, $\bar{x}_j(k)$ – средние значения сигналов выхода и входа в движущемся окне;

$$\bar{y}(k) = \sum_{k=1}^s y(k)/s; \quad \bar{x}_j(k) = \sum_{k=1}^s x_j(k)/s; \quad j = 1, m. \quad (5)$$

После определения оценок всех коэффициентов можно записать уравнение МНК-оценки сигнала выхода или его математическую модель

$$\hat{y}(k) = X(k)\hat{\epsilon}(k). \quad (6)$$

Качество идентификации определяется по коэффициенту множественной детерминации [9], который сравнивает дисперсии сигнала выхода с дисперсией его МНК-оценки:

$$B_{y.1,\dots,m} = S_{\hat{y}}^2(k) / S_y^2(k), \quad k = 1, s.$$

Идентификация считается удовлетворительной, если $B_{y.1,\dots,m} \geq 0,7$. Требования по точности идентификации и времени запаздывания обеспечиваются оптимизацией ширины движущегося окна [6].

Полученные в результате идентификации матрицы коэффициентов $\Phi(k)$, $\Psi(k)$, $\Phi_0(k)$, $H(k)$, $D(k)$, $H_0(k)$ модели (1) являются исходными для моделирования ОФК.

Определение оптимальных оценок вектора выхода САУ ТРДД на основе калмановской фильтрации. Алгоритм ОФК, согласованный с моделью (1), формирует оптимальную, в смысле минимума дисперсии, оценку вектора состояния САУ ТРДД и имеет вид [4]:

$$\begin{cases} P(k+1/k) = \Phi P(k/k)\Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T, \\ K(k+1) = P(k+1/k)H^T [HP(k+1/k)H^T + R]^{-1}, \\ P(k+1/k+1) = [E - K(k+1)H]P(k+1/k), \\ \hat{x}(k+1/k) = \Phi \hat{x}(k/k) + \Psi u(k) + \Phi_0, \\ \tilde{z}(k+1/k) = z(k+1) - H\hat{x}(k+1/k), \\ \hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1)\tilde{z}(k+1/k), \end{cases} \quad (7)$$

где $P(k+1/k)$ – ковариационная матрица ошибок прогноза; $P(k+1/k+1)$ – ковариационная матрица ошибок фильтрации; $K(k+1)$ – матричный коэффициент усиления; $\hat{x}(k+1/k)$ – прогнозная оценка вектора состояния; $\tilde{z}(k+1/k)$ – обновляемый процесс; $\hat{x}(k+1/k+1)$ – оптимальная оценка вектора состояния.

Из оптимальности оценки вектора состояния вытекают свойства

$$M\{\tilde{x}(k/k) \quad z^T(l)\} = 0 \quad \text{для } l \leq k, \quad (8)$$

$$M\{\hat{x}(k/k)\} = M\{\hat{x}(k+1/k)\} = M\{x(k)\},$$

где $\tilde{x}(k/k)$ – вектор ошибок фильтрации.

Оптимальная оценка вектора выхода САУ ТРДД

$$\hat{z}^T(k+1/k+1) = [\hat{x}(k+1/k+1) \quad \hat{z}_2(k+1/k+1)], \quad (9)$$

где $\hat{z}_2(k+1/k+1) = H_2\hat{x}(k+1/k+1) + D_2u(k+1) + H_0(k+1)$,

$$\hat{x}^T(k+1/k+1) = [\hat{n}_g(k+1) \quad \hat{n}_k(k+1)], \quad \hat{z}_2^T(k+1/k+1) = [\hat{P}_k(k+1) \quad \hat{T}_r(k+1)].$$

Уравнения фильтра (7) записаны в порядке вычисления оценок фильтрации.

ОФК обладает свойством, которое заключается в том, что размерность вектора измерений, поступающих в фильтр, может быть меньше размерности оцениваемого вектора состояния [3]. Это означает, что фильтр способен выполнять свои функции и после отказов датчиков канала измерения САУ ТРДД. Для парирования

отказов необходимо предусмотреть отключение неисправного датчика и привести в соответствие с изменившимся вектором измерения матрицы измерения и ковариационную матрицу шума измерения. Таким образом ОФК может работать при различных модификациях измерителей, как минимум на одном измерении.

Следует отметить, что метод ОФК чувствителен к точности математической модели и априорной информации о характеристиках входных сигналов. Так, в работах [11, 12] авторы метода Р. Калман и Р. Бьюси утверждают, что даже ограниченные ошибки в априорных данных о характере входного сигнала могут вызывать неограниченный рост ошибок фильтрации.

Поэтому при реализации алгоритма ОФК предварительно проводился корреляционный анализ входных сигналов.

Оценивание ковариационной матрицы шума возмущения в реальном времени. Корреляционный анализ позволяет оценить вероятностные характеристики системного шума только приблизительно. Фактически его характеристики изменяются случайным образом в процессе функционирования двигателя и неточность их определения может привести к расходимости фильтра [5].

К тому же, проведение такого анализа практически невозможно при функционировании алгоритма повышения отказоустойчивости в реальном времени.

Решение проблемы потери устойчивости фильтра Калмана из-за ошибок исходных данных о шуме возмущения предложил А.Г. Язвинский (*Jazwinski A.H.*), который разработал адаптивный фильтр Язвинского (ФЯ). Этот фильтр позволяет оценить ковариационную матрицу шума возмущения $Q(k)$ в реальном времени после определения значений обновляемого процесса или ошибки прогноза измерений, на которых работает ОФК [13].

Привлекательность алгоритма ФЯ заключается в том, что процедура вычисления матрицы $Q(k)$ встраивается в алгоритм ОФК, который уже согласован с математической моделью САУ ТРДД.

Введем обозначение $\tilde{z}(k+1/k) = v(k+1)$. Из предположений, которые относятся к модели (1) следует, что процессы $x(k)$, $z(k)$, $v(k)$, $w(k)$ независимы, а из условий (8) следует, что обновляемый процесс $v(k+1)$ обладает рядом свойств [14]:

$$v(k+1) = H\tilde{x}(k+1/k) + v(k+1),$$

$$M\{v(k)\} = 0,$$

$$M\{\tilde{x}(k/k) \ v^T(l)\} = 0 \text{ при } e < k,$$

$$M\{v(k) \ v^T(l)\} = 0 \text{ при } k \neq l,$$

тогда теоретическая ковариационная матрица обновляемого процесса принимает вид:

$$\text{cov}\{v(k+1)\} = M\{v(k+1)v^T(k+1)\} = HP(k+1/k)H^T + R(k+1). \quad (10)$$

В ФЯ матрица (10) приравнивается к выборочной ковариационной матрице $\text{cov}\{v^*(k+1)\}$, вычисленной по реализации обновляемого процесса $v^*(k+1)$ [7]:

$$M\{v(k+1)v^T(k+1)\} = v^*(k+1)v^{*T}(k+1). \quad (11)$$

После подстановки (10) в (11) получим матричную систему уравнений

$$H\Phi P(k/k)\Phi^T H^T + H\hat{G}\hat{Q}\hat{G}^T H^T + R(k+1) = v^*(k+1)v^{*T}(k+1). \quad (12)$$

Решением системы (12) является выражение для определения ковариационной матрицы шума возмущения в реальном времени [15]:

$$\hat{Q}(k+1) = \frac{(HG)^T [v^*(k+1)v^{*T}(k+1) - H\Phi P(k/k)\Phi^T H^T - R(k+1)]HG}{[(HG)^T HG]^2}. \quad (13)$$

Алгоритм ОФК (7) с процедурой вычисления матрицы (13) называют адаптивным фильтром Язвинского:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}(k+1/k) = \Phi\hat{x}(k/k) + \Psi u(k) + \Phi_0, \\ v(k+1) = z(k+1) - H\hat{x}(k+1/k), \\ Q = \begin{cases} \hat{Q}(k+1), & \text{если } \hat{Q}(k+1) > 0 \\ 0, & \text{если } \hat{Q}(k+1) \leq 0 \end{cases}, \\ P(k+1/k) = \Phi P(k/k)\Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T \\ K(k+1) = P(k+1/k)H^T [HP(k+1/k)H^T + R(k+1)]^{-1} \\ P(k+1/k+1) = [E - K(k+1)H]P(k+1/k) \\ \hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1)v(k+1) \end{array} \right. \quad (14)$$

Последовательность обработки измерений, поступающих в ФЯ, отличается от алгоритма ОФК. Это вызвано зависимостью матрицы $Q(k)$ от обновляемого процесса.

Вычисление матрицы (13) не требует значительных дополнительных затрат, так как коэффициенты модели (1) и обновляемый процесс также используются для определения оптимальной оценки вектора состояния ОФК.

Чтобы запустить процесс фильтрации необходимо задать ковариационную матрицу шума измерения $R(k)$, начальные значения ковариационной матрицы ошибок фильтрации $P(0/0)$ и оценки фильтрации $\hat{x}(0/0)$.

Возможность определения матрицы $Q(k)$ в реальном времени защищает фильтр от потери устойчивости и, следовательно, обеспечивает стабильность оценок вектора выхода САУ ТРДД.

Алгоритм повышения отказоустойчивости САУ ТРДД. Выражения и уравнения (3), (4), (13), (14), (9) составляют алгоритм обеспечения отказоустойчивости канала измерения САУ ТРДД.

Этот алгоритм формирует информационную избыточность в САУ ТРДД на основе оптимального наблюдателя, адаптивного фильтра Язвинского, позволяющего определять оптимальные оценки вектора выхода САУ ТРДД в реальном времени.

Предлагаемый алгоритм может выполнять свои функции как при нормальном функционировании САУ, так и при отказах датчиков измерения параметров двигателя.

Моделирование алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ ТРДД проводилось на основе измерений датчиков канала измерения САУ, полученных в результате летных испытаний двигателя ПС-90А в составе магистрального узкофюзеляжного самолета Ту-214 на стационарном (0,7 Ном) и переходном (Малый газ – 0,3 Ном – 0,7 Ном – 0,3 Ном – 0,7 Ном) режиме работы двигателя. Конструкция ТРДД ПС-90А и основные технические данные подробно изложены в [1, с. 18–23], [16, 17].

Общий вид двигателя типа ПС-90А приведен на рис. 1.

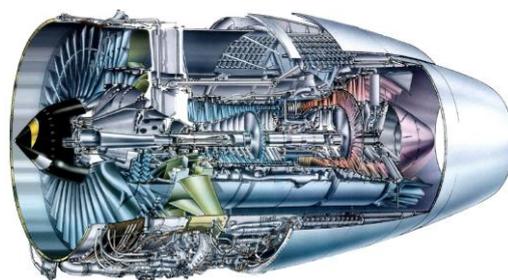


Рис. 1. Общий вид двигателя ПС-90А

В двигателе ПС-90А в составе САУ-90 главное вычислительное устройство – электронный регулятор двигателя РЭД-90. Сам РЭД-90 представляет собой специализированную электронную цифровую вычислительную машину, работающую в реальном масштабе времени, оснащенную устройствами сопряжения с датчиками, сигнализаторами, исполнительными элементами двигателя и системами самолета. Вычислитель – сам блок РЭД-90, выполнен на базе микропроцессорного комплекта 588 серии. Вычислитель содержит системное ОЗУ и три микро-ЭВМ (МЭВМ), каждая из которых имеет в своем составе процессор, запоминающие устройства ПЗУ объемом 6Кх16 и ОЗУ объемом 1Кх16. Все три МЭВМ работают независимо друг от друга [1, с. 198].

Число опросов параметров на стационарном составило 15000 и на переходном режиме работы двигателя 5000. Частота опроса параметров 50 Гц.

Реализация алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ ТРДД проводилась в среде Matlab, так как она имеет удобный интерфейс для матричных операций и используется на специализированных стендах для полунатурных испытаний САУ ТРДД [18, 19].

Применялась аппаратная платформа со следующими параметрами: процессор Intel Core i7 2,67 ГГц, ОЗУ 12 ГБ. Вычислительные затраты при реализации алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ ТРДД составляют при использовании ОФК 1,83 с, и при использовании ФЯ – 2,03 с, объем рабочего кода составил 3,48 и 3,75 КБ соответственно.

Результаты моделирования представлены в виде таблиц и графиков. Фильтры Калмана и Язвинского работают на прямых измерениях вектора состояния САУ ТРДД. Параметры указаны в процентах от максимальных значений.

В табл. 1 приведены результаты анализа качества идентификации математических моделей сигналов датчиков САУ ТРДД при оптимальной ширине движущегося окна на установившемся и переходном режимах. Оптимизация окна проводилась при максимально возможном времени запаздывания.

Таблица 1

Оценивание (анализ) качества идентификации	Режим	Оценки			
		\hat{n}_e	\hat{n}_k	\hat{P}_k	\hat{T}_T
Смещение МНК-оценки, %	Стационарный	0,1380	0,0628	0,1516	0,0213
	Переходный	1,1077	0,4308	1,1044	0,1298
Коэффициент детерминации	Стационарный	0,9133	0,9518	0,9234	0,8960
	Переходный	0,9571	0,9014	0,9374	0,8932
Стандартная ошибка, %	Стационарный	1,6793	0,6435	1,7180	0,3763
	Переходный	2,5336	1,0217	3,4998	0,3962
Запаздывание, с	Стационарный	2	2	2	2
	Переходный	2	2	2	2

Смещение МНК-оценок на установившемся режиме составляет (0,02–0,15) %, на переходном (0,13–1,11) %. Стандартные ошибки МНК-оценок на установившемся режиме составляет (0,38–1,00) %, на переходном (0,89–0,96) %. Коэффициент детерминации на установившемся режиме (0,9–0,95), на переходном (0,89–0,96).

Результаты анализа качества идентификации математической модели САУ ТРДД показывают адекватность полученных математических моделей измерениям соответствующих датчиков.

В табл. 2 приведены результаты анализа фактических ошибок оценивания вектора выхода САУ ТРДД на основе ФК и ФЯ на установившемся режиме [20].

Таблица 2

Оценки вектора выхода САУ ТРДД	Фильтр Явзинского		Фильтр Калмана	
	Смещение оценок фильтрации, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Смещение оценок фильтрации, %	Среднеквадратическое отклонение, %
\hat{n}_e	0,1396	0,1380	-0,2700	0,2725
\hat{n}_k	-0,0140	0,0192	0,0643	0,0656
\hat{p}_k	0,0391	0,2523	0,0891	0,2647
\hat{T}_T	0,0602	0,1572	0,1425	0,2057

В табл. 3 приведены результаты анализа фактических ошибок оценивания вектора выхода САУ ТРДД на основе ФК и ФЯ на переходном режиме.

Таблица 3

Оценки вектора выхода САУ ТРДД	Фильтр Явзинского		Фильтр Калмана	
	Смещение оценок фильтрации, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Смещение оценок фильтрации, %	Среднеквадратическое отклонение, %
\hat{n}_e	2,0987	3,1158	3,1121	4,0853
\hat{n}_k	1,4925	1,7072	0,4062	0,6514
\hat{p}_k	-0,9920	3,9123	-1,3972	4,1841
\hat{T}_T	0,5760	0,9021	0,0184	0,6802

На рис. 2 показаны процессы изменения сигналов выхода САУ ТРДД и соответствующие оптимальные оценки при работе ФК и ФЯ на установившемся режиме.

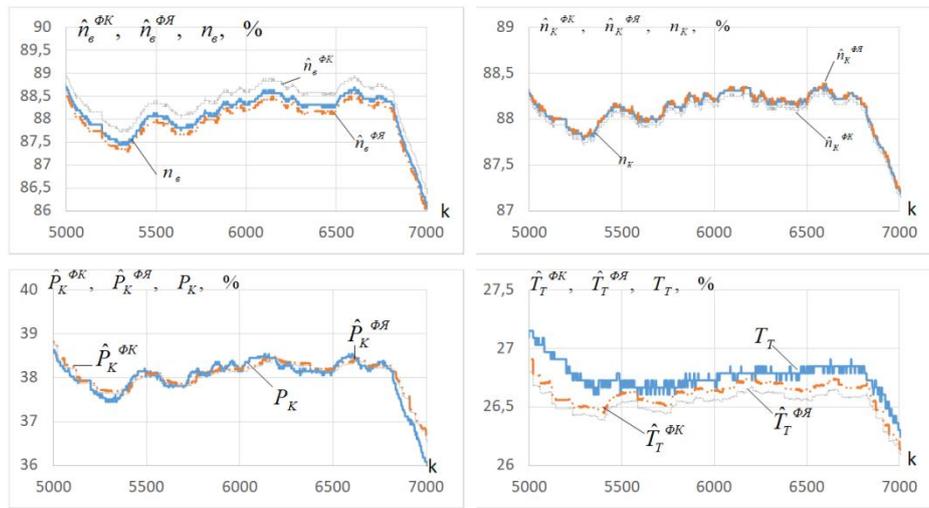


Рис. 2. Процессы изменения сигналов выхода САУ ТРДД и соответствующие оптимальные оценки при работе ФК и ФЯ на установившемся режиме

На рис. 3 показаны процессы изменения сигналов выхода САУ ТРДД и соответствующие оптимальные оценки при работе ФК и ФЯ на переходном режиме.

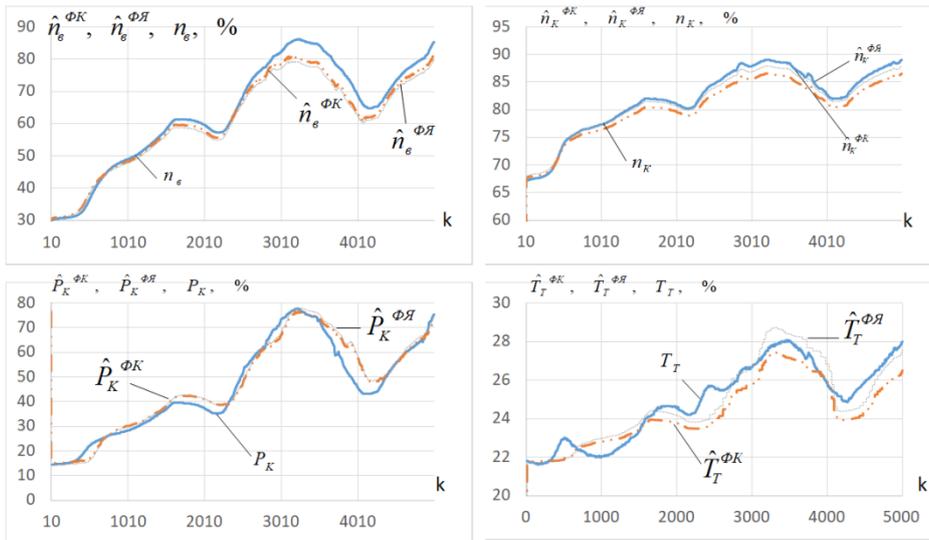


Рис. 3. Процессы изменения сигналов выхода САУ ТРДД и соответствующие оптимальные оценки при работе ФК и ФЯ на переходном режиме

При анализе качества оценок вектора выхода САУ ТРДД определены их смещение и стандартные ошибки на установившемся и переходном режимах.

На установившемся режиме максимальное смещение оценок ФЯ составляет 0,1%, ФК – 0,27%, максимальная стандартная ошибка оценок ФЯ составляет 0,25%, ФК – 0,26%.

На переходном режиме максимальное смещение оценок ФЯ составляет 2,1%, ФК – 3,11%, максимальная стандартная ошибка оценок ФЯ составляет 3,12%, ФК – 4,19%.

Результаты анализа качества оценивания вектора выхода САУ ТРДД на основе фильтров Язвинского и Калмана показывают, что ошибки оценивания вектора выхода фильтром Язвинского меньше ошибок оценивания фильтром Калмана.

Однако следует отметить, что точность оценивания вектора выхода САУ ТРДД обеспечивают как ФЯ, так и ФК. Преимущество ФЯ в том, что в отличие от ФК он защищен от потери устойчивости. Поэтому в предлагаемом методе резервирования датчиков канала измерения САУ ТРДД предпочтительней использовать фильтр Язвинского.

Направление дальнейших исследований предусматривает испытания предлагаемого алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ при имитации различных типов отказов датчиков n_g , n_k , P_K , T_T на стенде полунатурного моделирования с использованием технологий модельно-ориентированного проектирования в условиях АО «ОДК-Авиадвигатель» [19]. В качестве объекта исследования планируется использовать САУ авиационного двигателя пятого поколения ПД-14, применяемого для семейства российских самолетов типа МС-21.

Заключение. Разработан алгоритмический метод повышения отказоустойчивости САУ ТРДД на основе оптимальных наблюдателей, который позволяет получать дополнительную информацию о состоянии САУ ТРДД в процессе работы двигателя.

Метод обеспечения отказоустойчивости САУ ТРДД включает алгоритм рекуррентной идентификации математической модели и согласованный с моделью адаптивный фильтр Язвинского. Этот метод позволяет формировать оптимальные оценки вектора выхода САУ ТРДД в реальном времени, а также снижает риски, связанные с возможной расходимостью фильтра.

Результаты анализа качества оценок вектора выхода САУ ТРДД на стационарных и переходных режимах работы подтверждают работоспособность предлагаемого метода повышения отказоустойчивости по параметрам: частота вращения ротора компрессора низкого давления n_g , частота вращения ротора компрессора высокого давления n_k , давление воздуха за компрессором высокого давления P_K , температура газа за турбиной низкого давления T_T .

Полученные результаты позволяют рекомендовать алгоритмический метод повышения отказоустойчивости САУ ТРДД на основе оптимального наблюдателя фильтра Язвинского для использования в перспективных САУ ТРДД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иноземцев А.А., Коняев Е.А., Медведев В.В., Нерадько А.В., Рясов А.Е.* Авиационный двигатель ПС-90А / под ред. А.А. Иноземцева. – М.: Либра-К, 2007. – 320 с.
2. *Браммер К., Зиффлинг Г.* Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. – М.: Наука, 1982. – 199 с.
3. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
4. *Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Саженок А.Н., Лисовин И.Г., Грибков И.Н., Плишевых А.С.* Синтез оптимального наблюдателя, согласованного с математической моделью САУ ТРДД // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 57. – С. 162-171.
5. *Ривкин С.С.* Метод оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах. Ч. 2. Использование фильтров Калмана в инерциальных навигационных системах. – Судостроение, 1974. – 156 с.
6. *Ламанова Н.Г., Плишевых А.С., Грибков И.Н., Фатыков А.И.* Идентификация математической модели системы автоматического управления газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31. – С. 121-135.
7. *Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Саженок А.Н., Грибков И.Н., Плишевых А.С.* Синтез оптимального наблюдателя при отсутствии априорной информации о характеристиках шума возмущения системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 63. – С. 70-79.

8. *Августинович В.Г., Акиндинов В.А.* Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984. – 196 с.
9. *Фёрстер Э., Рёнц Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа Руководство для экономистов: пер. с нем. и предисловие В.М. Ивановой. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.
10. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
11. *Kalman R.* A new approach to linear filtering and prediction problems, Transactions of American society of mechanical engineers // Journal of basic engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35-46.
12. *Kalman R., Bucy R.* New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Transactions of the American society of mechanical engineers // Journal of basic engineering. – 1961. – Vol. 83. – P. 95-108.
13. *Jazwinski A.H.* Stochastic Processes and Filtering Theory. – New York: academic press, 1970. – 376 p.
14. *Медич Д.* Статистические оптимальные линейные оценки и управление / под ред. А.С. Шаталова. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
15. *Ламанова Н.Г.* Адаптивное оценивание вектора выхода САУ ГТД // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. – 2000. – № 4. – С. 37-42.
16. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 1. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы: учебник. – М.: Машиностроение, 2008. – 208 с.
17. *Коцеев А.Б., Платонов А.А., Хабров А.В.* Аэродинамика самолетов семейства Ту-204/214: учеб. пособие. – М.: ОАО «Туполев», Изд-во «Полигон-Пресс», 2009. – 304 с.
18. *Татарников Олег.* Обзор программ для символьной математики → Альтернативные пакеты // КомпьютерПресс. – 2006. – № 7.
19. *Плешивых А.С. Заборских А.А. Фатыков А.И.* Стенд для испытаний электронной части систем автоматического управления газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 22. – С. 90-102.
20. *Сизиков В.С.* Устойчивые методы обработки результатов измерений: учеб. пособие. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 240 с.

REFERENCES

1. *Inozemtsev A.A., Konyaev E.A., Medvedev V.V., Nerad'ko A.V., Ryasov A.E.* Aviatsonnyy dvigatel' PS-90A [Aviation engine PS-90A], ed. by A.A. Inozemtseva. Moscow: Libra-K, 2007, 320 p.
2. *Brammer K., Ziffling G.* Fil'tr Kalmana-B'yusi. Determinirovannoe nablyudenie i stokhasticheskaya fil'tratsiya [Kalman-Bucy filter. Deterministic observation and stochastic filtering]. Moscow: Nauka, 1982, 199 p.
3. *Izerman R.* Tsifrovye sistemy upravleniya [Digital control systems]. Moscow: Mir, 1984, 541 p.
4. *Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Sazhenkov A.N., Lisovin I.G., Gribkov I.N., Pleshivykh A.S.* Sintez optimal'nogo nablyudatelya, soglasovannogo s matematicheskoy model'yu SAU TRDD [Synthesis of an optimal observer consistent with the mathematical model of the ACS turbojet engine], *Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2019, No. 57, pp. 162-171.
5. *Rivkin S.S.* Metod optimal'noy fil'tratsii Kalmana i ego primeneniye v inertsial'nykh navigatsionnykh sistemakh. Ch. 2. Ispol'zovanie fil'trov kalmana v inertsial'nykh navigatsionnykh sistemakh [The method of optimal Kalman filtering and its application in inertial navigation systems. Part 2. The use of Kalman filters in inertial navigation systems]. Sudostroeniye, 1974, 156 p.
6. *Lamanova N.G. Pleshivykh A.S. Gribkov I.N. Fatykov A.I.* Identifikatsiya matematicheskoy modeli sistemy avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinnogo dvigatelya [Identification of the mathematical model of the automatic control system of a gas turbine engine], *Vestnik PNIPIU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems], 2019, No. 31, pp. 121-135.

7. *Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Sazhenkov A.N., Gribkov I.N., Pleshivykh A.S.* Sintez optimal'nogo nablyudatelya pri otsutstvii apriornoy informatsii o kharakteristikakh shuma vozmushcheniya sistemy avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya turboreaktivnogo dvukhkонтурного dvigatelya [Synthesis of an optimal observer in the absence of a priori information about the noise characteristics of the disturbance of the automatic control and control system of a turbojet two-circuit engine], *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2020, No. 63, pp. 70-79.
8. *Avgustinovich V.G., Akindinov V.A.* Identifikatsiya sistem upravleniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Identification of control systems of aviation gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 196 p.
9. *Ferster E., Rents B.* Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza Rukovodstvo dlya ekonomistov [Methods of correlation and regression analysis A guide for economists]: transl. from germ. and preface V.M. Ivanovoy. Moscow: Finansy i statistika, 1983, 304 p.
10. *Linnik Yu.V.* Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniya [The method of least squares and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing]. Moscow: Fizmatgiz, 1958, 334 p.
11. *Kalman R.* A new approach to linear filtering and prediction problems, Transactions of American society of mechanical engineers, *Journal of basic engineering*, 1960, Vol. 82, pp. 35-46.
12. *Kalman R., Bucy R.* New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Transactions of the American society of mechanical engineers, *Journal of basic engineering*, 1961, Vol. 83, pp. 95-108.
13. *Jazwinski A.H.* Stochastic Processes and Filtering Theory. New York: academic press, 1970, 376 p.
14. *Medich D.* Statisticheskie optimal'nye lineynye otsenki i upravlenie [Statistical optimal linear estimates and control], ed. by A.S. Shatalova. Moscow: Energiya, 1973, 440 p.
15. *Lamanova N.G.* Adaptivnoe otsenivanie vektora vykhoda SAU GTD [Adaptive estimation of the ACS GTD output vector], *Vestnik PGTU. Ae-rokosmicheskaya tekhnika* [Bulletin of PSTU. Aerospace engineering], 2000, No. 4, pp. 37-42.
16. *Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L.* Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. T. 1. Obshchie svedeniya. Osnovnye parametry i trebovaniya. Konstruktivnye i silovye skhemy: uchebnik [Fundamentals of the design of aircraft engines and power plants. Vol. 1. General information. Basic parameters and requirements. Constructive and power circuits: textbook]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 208 p.
17. *Koshcheev A.B., Platonov A.A., Khabrov A.V.* Aerodinamika samoletov semeystva Tu-204/214: ucheb. posobie [Aerodynamics of Tu-204/214 family aircraft: textbook]. Moscow: OAO «Tupolev», Izd-vo «Poligon-Press», 2009, 304 p.
18. *Tatarnikov Oleg.* Obzor programm dlya simvol'noy matematiki → Alternativnye pakety [Overview of programs for symbolic mathematics → Alternative packages], *Komp'yuterPress* [ComputerPress], 2006, No. 7.
19. *Pleshivykh A.S., Zaborskikh A.A., Fatykov A.I.* Stend dlya ispytaniy elektronnoy chasti sistem avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinnogo dvigatelya [Test bench for electronic part of automatic control systems of a gas turbine engine], *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems], 2017, No. 22, pp. 90-102.
20. *Sizikov V.S.* Ustoychivye metody obrabotki rezul'tatov izmereniy: ucheb. posobie [Sustainable methods of processing measurement results: a textbook]. Saint Petersburg: SpetsLit, 1999, 240 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.Г. Лисовин.

Иноземцев Александр Александрович – АО «ОДК-Авиадвигатель»; e-mail: office@avid.ru; г. Пермь, Россия; тел.: + 73422813854; зам. генерального директора по управлению НПК «Пермские моторы»; управляющий директор – генеральный конструктор; д.т.н.; профессор; член-корр. РАН; зав. кафедрой «Авиационные двигатели» ПНИПУ.

Плешивых Артур Сергеевич – e-mail: arthur.p.s.1995@mail.ru; тел.: +73422813530; инженер отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления; аспирант кафедры «Прикладная математика» ПНИПУ.

Грибков Игорь Николаевич – e-mail: gribkov@avid.ru; тел.: +73422813530; зам. начальника отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления.

Саженов Алексей Николаевич – e-mail: sazhenkov@avid.ru; тел.: +73422409783; к.т.н.; помощник генерального конструктора.

Ламанова Надежда Геннадьевна – ПНИПУ; e-mail: nglaman@mail.ru; г. Пермь, Россия; тел.: +73422391303; доцент кафедры «Прикладная математика».

Inozemtsev Aleksandr Alexandrovich – UEC-Aviadvigatel JSC; e-mail: office@avid.ru; Perm, Russia; phone: + 73422813854; dr. of eng. sc.; Corresponding Member of the RAS; Managing Director-General Designer of UEC-Aviadvigatel JSC; head of the Aviation Engines Chair in the Perm National Research Polytechnic University.

Pleshivykh Artur Sergeevich – e-mail: arthur.p.s.1995@mail.ru; phone: +73422813530; engineer of Design of Design and Experimental Works and Control Systems Development Department; graduate student of the Applied Mathematics chair in the Perm National Research Polytechnic University;

Gribkov Igor Nikolaevich – e-mail: gribkov@avid.ru; phone: +73422813530; deputy head of Design and Experimental Works and Control Systems Development department.

Sazhenkov Alexey Nikolaevich – e-mail: sazhenkov@avid.ru; phone: +73422409783; cand. of eng. sc.; assistant General Designer.

Lamanova Nadezhda Gennad'evna – Perm National Research Polytechnic University; e-mail: nglaman@mail.ru; Perm, Russia; phone: +73422391303; assistant professor of the Applied Mathematics chair.

УДК 007.52:621.865.8:004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-78-88

В.В. Свиридов**ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Бурное развитие «многоагентных систем», как самостоятельного и многопланового раздела искусственного интеллекта, привлекает к себе многих исследователей в различных сферах деятельности. Темпы прогресса в развитии информационных технологий, распределённых информационных систем, компьютерной техники определяют возможности применения технологий робототехники в Вооружённых силах Российской Федерации. Представленные в статье факторы санкционируют необходимость внедрения в войска новых интеллектуальных технологий – автономных робототехнических комплексов (систем). Развитие методов искусственного интеллекта позволяет сделать новый шаг к изменению стиля взаимодействия комплексов между собой в составе робототехнической системы. Возникла идея создания так называемых "автономных комплексов", которые породили уже новый стиль адаптивного группового управления. Вместо взаимодействия, иницируемого пользователем-оператором путём команд и прямых манипуляций, комплексы самостоятельно вовлекаются в совместный процесс решения общей задачи в условиях недетерминированной динамической среды. В статье предложен формализованный подход к конструированию вариантов архитектур группового взаимодействия автономных робототехнических комплексов в системе, основанного на законе открытого управления, т.е. индуцированных и достоверных предпочтений каждого комплекса к действию, удовлетворяющих условиям совершенного согласования их деятельности, путём идентификации параметров, при которых максимизируется целевая функция в различных режимах функцио-

нирования робототехнической системы. Представлена формализованная постановка задачи синтеза системы адаптивного группового управления автономными робототехническими комплексами в условиях априорной неопределённости. Архитектура группового взаимодействия комплексов адаптивно выстраивается исходя из условий внешней среды и внутреннего состояния системы, в которых каждый комплекс группы функционирует для достижения общей цели (решения системной задачи) в рассматриваемый момент времени.

Робототехнический комплекс; внешняя среда; внутренняя среда; индуцированные предпочтения; централизованное и децентрализованное управление; адаптивное групповое взаимодействие; распределённая система управления; архитектура.

V.V. Sviridov

THE FORMALIZED APPROACH TO SYNTHESIS OF ARCHITECTURE IN THE SYSTEM OF ADAPTIVE GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF THE NONDETERMINISTIC DYNAMIC ENVIRONMENT

The rapid development of "multi-agent systems" as an independent and multifaceted section of artificial intelligence attracts many researchers in various fields of activity. The pace of progress in the development of information technologies, distributed information systems, and computer technology determines the possibilities of using robotics technologies in the Armed Forces of the Russian Federation. The factors presented in the article authorize the need to introduce new intelligent technologies into the troops - autonomous robotic complexes (systems). The development of artificial intelligence methods makes it possible to take a new step towards changing the style of interaction of complexes with each other as part of a robotic system. The idea of creating so-called "autonomous complexes" arose, which gave rise to a new style of adaptive group management. Instead of interaction initiated by the user-operator through commands and direct manipulations, complexes are independently involved in the joint process of solving a common problem in a non-deterministic dynamic environment. The article proposes a formalized approach to the design of architectures for group interaction of autonomous robotic complexes in a system based on the law of open control, i.e. induced and reliable preferences of each complex for action, satisfying the conditions of perfect coordination of their activities, by identifying parameters at which the objective function is maximized in various modes of functioning of the robotic system. A formalized formulation of the problem of synthesis of the adaptive group control system of autonomous robotic complexes under conditions of a priori uncertainty is presented. The architecture of group interaction of complexes is adaptively built based on the conditions of the external environment and the internal state of the system, in which each complex of the group functions to achieve a common goal (solving a system problem) at the time under consideration.

Robotic complex; environment; internal environment; induced preferences; centralized and decentralized management; adaptive group interaction; distributed control system; architecture.

Введение. Главным приоритетом Российской Федерации в области военного строительства является создание современной армии, основу которой составляют системы и комплексы вооружения, военной и специальной техники, обеспечивающие адекватное реагирование на весь спектр угроз военной безопасности, не только существующих, но и вероятных в будущем. Решение этой задачи осуществляется в рамках проведения согласованной и сбалансированной военно-технической политики, основы которой утверждены Президентом Российской Федерации 26 января 2011 года.

Как отмечается в [1], существенно изменился характер современных войн, которые стали высокотехнологичными, дистанционными, динамичными и скоротечными, требующими принципиально новых подходов, как к их ведению, так и военно-техническому обеспечению.

В современных условиях назрела необходимость выработки новых подходов к организации обеспечения Вооружённых Сил России современным вооружением, военной и специальной техникой. Это обусловлено следующими факторами [2]:

- ◆ заданием высоких требований к тактико-техническим характеристикам образцов вооружения с учетом развития форм и способов вооружённой борьбы;
- ◆ сокращением сроков подготовки войск (сил) к ведению военных действий и высокой интенсивностью и скоротечностью вооружённых конфликтов;
- ◆ повышением уязвимости объектов к воздействию средств поражения противника и действиям террористических групп в районах действия войск;
- ◆ увеличением длительности и сложности технологического цикла производства основных видов вооружения и военной техники.

Результаты анализа существующих систем и средств охраны показали необходимость создания и внедрения в войска нового поколения систем и технических средств охраны, оснащения подразделений современными средствами (комплексами) наблюдения и разведки с автоматизацией сбора и обработки информации, необходимость в автоматизации процессов управления силами и средствами охраны в позиционных районах войск. Одним из путей решения перечисленных выше проблем является применение в войсках робототехнических комплексов (систем) военного назначения.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16 декабря 2015 года № 623 робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения определены как приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации [3]. Необходимо, чтобы системы робототехнические (СРТ) и робототехнические комплексы (РТК) [4] обладали свойствами: многофункциональности, совместимости и интегрируемости с существующими и перспективными средствами (системами) охраны объектов, обладали адаптивностью, коммуникативностью, способностью к автономному (самостоятельному) выполнению задач в условиях неопределенной динамично развивающейся обстановки.

Активное развитие методов и технологий распределённого искусственного интеллекта, например, многоагентные системы (МАС) [5–8], достижения в области аппаратных и программных средств поддержки концепции распределённости и открытости привели к осознанию важности того, что РТК должны адаптироваться к условиям сложной внешней среды, осуществлять групповое взаимодействие, интегрироваться в системы, совместно решающие сложные задачи.

В настоящее время в рамках МАС используются следующие подходы к формализации задач, решаемых на уровне кооперации агентов. Совместное поведение различных объектов изучается в рамках многих научных дисциплин. Выделим среди них те, которые представляются наиболее адекватными при решении задач коллективного управления интеллектуальными агентами [9]:

- ◆ *распределенный искусственный интеллект* [10, 11]. Эта область искусственного интеллекта занимается самыми общими аспектами коллективного поведения агентов. Здесь основу составляют результаты, полученные в теории распределенных систем и теории принятия решений;
- ◆ *теория игр* [12]. Аппарат теории игр часто используется для исследования коллективов интеллектуальных агентов. Многие ситуации, возникающие в многоагентной системе, находят подходящие аналоги в теории игр. Исследуются кооперативные игры, различные стратегии ведения торгов (переговоров) и др., которые являются аналогами ряда моделей коллективного поведения агентов;
- ◆ *теория коллективного поведения автоматов* [13] исследует поведение больших коллективов автоматов с примитивными функциями. Поведение автомата может рассматриваться как недетерминированное, что позволяет строить различ-

ные вероятностные модели. Допускается обучение автомата при помощи штрафов и поощрений. Автомат может быть наделен памятью, в которой он в некоторой форме запоминает предыдущие штрафы и поощрения, и может использовать эту информацию для улучшения своего и коллективного поведения в соответствии с некоторой функцией дохода;

♦ *биологические, экономические и социальные модели* [14].

За прошедшее время подходы к решению подобных задач значительно изменились, требуя, в частности, новых способов формализации, математических моделей и алгоритмов адаптивного группового управления РТК. Концепции, базовые понятия, принципы построения, перспективы практического применения и другие аспекты создания робототехнических систем рассмотрены во многих современных работах, в том числе Вяткина А.Ю., Смирнова Д.В., Кочетова И.А., Городецкого В.И., Карсаева О.В., Самойлова В.В., Пантелеева А.В., Скавинской Д.В., Серебрякова С.В., Бухвалова О.Л., Скобелева П.О. и других исследователей. Однако математический аппарат и программные средства, приемлемые для адаптивного группового управления поведением РТК, составляющих систему, в реальном времени и оперативной оценки ресурсов, необходимых для решения прикладной задачи, к настоящему времени в полном объеме ещё не созданы.

Синтез архитектуры системы группового управления РТК, а также рациональное поведение отдельного комплекса при решении общей целевой задачи в априори неопределённой среде, существенно зависят от концептуальной модели РТК и формализма особенностей её описания, математической модели кооперации комплексов при совместном их функционировании в системе, а также от ряда других факторов. Для этого необходимо и достаточно, чтобы РТК является автономным, т.е. обладал способностью вырабатывать рациональное решение к действию и формировать свои действия для достижения поставленной цели без вмешательства человека или других вспомогательных систем и, при этом, выполнял самоконтроль своего внутреннего состояния.

Формальная постановка задачи исследования. Пусть существует система робототехническая (СРТ) – \mathcal{R} , состоящая из группы автономных РТК – R_j ($j = \overline{1, N}$), функционирующая в условиях недетерминированной динамической среды и решающая системную задачу противодействия наземному нарушителю. Качественное выполнение поставленной перед СРТ задачи зависит от её внутреннего состояния Q и внешней среды E , в которой функционируют комплексы $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$).

Эффективность функционирования СРТ ВН оценивается в соответствии с критериями:

$$P_{\text{пор.нар.}} \geq P_{\text{пор.нар.}}^{\text{треб}}; \quad t_{\text{пор.нар.}} \rightarrow \min; \quad C \rightarrow \min. \quad (1)$$

где $P_{\text{пор.нар.}}$ – вероятность поражения нарушителя (группы нарушителей), т.е. выполнения системой задачи; $t_{\text{пор.нар.}}$ – время, за которое система решит поставленную задачу; C – экономическая эффективность функционирования системы.

СРТ ВН решает задачи охраны и обороны объекта в следующих режимах функционирования при выполнении условий (1):

♦ *режим «А»*, при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является стоимость выполнения задачи (C), т.е. определяется суммарным количеством боеприпасов, затраченных каждым РТК ВН для достижения общей цели;

♦ *режим «Б»*, при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является вероятность решения поставленной задачи $P_{\text{пор.нар.}}$;

♦ режим «В», при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является оперативность решения задачи $t_{\text{порнар}}$.

Состояние внешней среды \mathbf{E} вокруг j -го комплекса в момент времени t описывается матрицей состояний: действий нарушителя \mathbf{g} и условиями местности \mathbf{m} , в которой функционирует РТК ВН R_j ($j = \overline{1, N}$):

$$E_j(t) = \begin{vmatrix} e_j^{1,1} & e_j^{1,2} & \dots & e_j^{1,v} \\ e_j^{2,1} & e_j^{2,2} & \dots & e_j^{2,v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_j^{b,1} & e_j^{b,2} & \dots & e_j^{b,v} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $e_j^{g,m}(t)$, при $g = (\overline{1, \dots, v})$, $m = (\overline{1, \dots, b})$ - характеристики участка внешней среды вокруг j -го комплекса.

Состояние внешней среды, в которой функционирует система \mathfrak{R} в момент времени t , описывается вектор-функцией $E(t) = \langle E_1(t), E_2(t), \dots, E_N(t) \rangle$.

В начальный момент времени t_0

$$E(t_0) = \langle E_1(t_0), E_2(t_0), \dots, E_N(t_0) \rangle, \quad (3)$$

в конечный момент времени t_k

$$E(t_k) = \langle E_1(t_k), E_2(t_k), \dots, E_N(t_k) \rangle. \quad (4)$$

Состояние внешней среды \mathbf{E} изменяется в процессе группового взаимодействия \mathbf{B} комплексов $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$).

Действия нарушителя \mathbf{g} ограничены моделью его воздействия по объектам, а условия местности \mathbf{m} – условиями, при которых функционирует объект охраны:

$$E(t) = \{E^{\text{ДОП.}}(t)\} \subset \{E\}. \quad (5)$$

Внутреннее состояние \mathbf{Q} системы \mathfrak{R} зависит от тактико-технического состояния каждого комплекса $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) и возможностей их группового взаимодействия \mathbf{B} в условиях внешней среды \mathbf{E} .

Состояние каждого РТК ВН R_j ($j = \overline{1, N}$) в момент времени t описывается матрицей состояний:

$$R_j(t) = \begin{vmatrix} r_j^{1,1} & r_j^{1,2} & \dots & r_j^{1,h} \\ r_j^{2,1} & r_j^{2,2} & \dots & r_j^{2,h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_j^{l,1} & r_j^{l,2} & \dots & r_j^{l,h} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $r_j^{i,k}(t)$, при $i = (\overline{1, \dots, l})$, $k = (\overline{1, \dots, h})$ – переменные количественные и качественные характеристики, определяющие техническое состояние и тактические возможности j -го комплекса в текущий момент времени t , при функционировании во внешней среде \mathbf{E} (например, количество энергоресурса, скорость наведения оружия, количество боеприпасов и др.).

Состояние системы задаётся вектор-функцией $\mathfrak{R}(t) = \langle R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t) \rangle$. Начальное состояние СРТ ВН, в момент времени t_0 , описывается:

$$\mathfrak{R}(t_0) = \langle R_1(t_0), R_2(t_0), \dots, R_N(t_0) \rangle, \quad (7)$$

конечное состояние системы, в момент времени t_k

$$\mathfrak{R}(t_k) = \langle R_1(t_k), R_2(t_k), \dots, R_N(t_k) \rangle. \quad (8)$$

Состояния комплексов с течением времени изменяются не только при выполнении ими действий D_j ($j=1 \dots N$), но и при влиянии на них параметров внешней среды E .

Каждый комплекс, входящий в систему, в момент времени t имеет ряд допустимых состояний:

$$R_j(t) = \{R_j^{don}(t)\} \subset \{R\}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Действия D_j ($j=1 \dots N$), выполняемые комплексом $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$), описываются с помощью непрерывными вектор-функциями $D_j(t) = [d_{1,j}(t), d_{2,j}(t), \dots, d_{p,j}(t)]^T$, а множество действий, которые может выполнять комплекс при решении групповой задачи, описывается p -мерным пространством $\{D\}_j$.

Действия, выполняемые группой комплексов, т.е. системой \mathfrak{R} описываются непрерывной вектор-функцией $D_{\mathfrak{R}}(t) = \langle D_1(t), D_2(t), \dots, D_j(t) \rangle$.

Групповое взаимодействие B при множестве действий комплексов, описываются как:

$$B = \{D_{\mathfrak{R}}\} = \{D\}_1 \cup \{D\}_2 \cup \dots \cup \{D\}_N. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что совокупность действий, выполняемых группой комплексов, для достижения общей цели (решении общей задачи) представляет собой групповое управление комплексами $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$). Решения к действию u_j комплексов $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) вырабатываются распределённой системой группового управления, а сами действия D_j выполняются комплексами R_j .

Взаимодействие B комплексов группы в системе \mathfrak{R} при решении общей задачи зависит от вида управления: централизованного и децентрализованного.

При *централизованном управлении* [15], групповое взаимодействие комплексов зависит от выработки центральным устройством рационального решения к действию для группы РТК, на основании предпочтений комплексов группы. Роль центрального устройства управления может выполнять пункт управления СРТ ВН, либо ведущий РТК ВН. Выбор комплексов для качественного решения задачи в момент времени t осуществляется исходя из технического состояния и тактических возможности j -го комплекса в момент времени t , при функционировании во внешней среде E . Взаимодействие комплексов при централизованном управлении в момент времени t описывается вектор-функцией:

$$B_{\mathfrak{R}}(t) = \{D_{\mathfrak{R}}(t)\} \cap \langle \{D\}_1(t) \cup \{D\}_2(t) \cup \dots \cup \{D\}_N(t) \rangle. \quad (11)$$

По-сути, выражение (11) представляет собой структуру робототехнической системы в момент времени t , которую формирует центральное устройство управления, с учётом выражения (1).

Изменение этой структуры взаимодействия группы комплексов, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{S}_{\mathfrak{R}}(t) = f(B_{\mathfrak{R}}(t), E(t), Q(t), t). \quad (12)$$

В стационарной внешней среде решения к действию, т.е. алгоритмы функционирования, комплексы выбирают из базы данных в соответствии с обстановкой, а взаимодействие РТК ВН осуществляется в соответствии с выражением (11).

В неопределённой динамической среде, где изменяется либо тактика действий противника, либо условия местности, а как следствие и состояние самих комплексов, структура системы может меняться и описываться выражением (12).

При децентрализованном управлении (стайное, коллективное, роевое) [16] группой комплексов, подсистема управления каждого комплекса $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$, с учётом его состояния выражение (6) и данных от средств разведки о внешней среде E (выражение 2) в области функционирования комплекса, с учётом ограничений (4) и (8), вырабатывает решение к действию, описываемое вектор-функцией: $Y_j(t) = [y_{1,j}(t), y_{2,j}(t), \dots, y_{e,j}(t)]^T$, на основании которого комплекс $R_j (j = \overline{1, N})$ формирует свои действия D_j .

Решение общей групповой задачи строится на коммуникативном согласовании скоординированных действий комплексов, входящих в робототехническую систему \mathfrak{R} .

Распределённая система управления в момент времени t , на основании решений Y_j , вырабатывает общий замысел (сценарий) достижения общей цели комплексами, который описывается непрерывной вектор-функцией: $Y_{\mathfrak{R}}(t) = \langle Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_N(t) \rangle$,

В соответствии с замыслом $Y_{\mathfrak{R}}(t)$ организуется взаимодействие комплексов $R_j (j = \overline{1, N})$, т.е. формируется структура кластера комплексов S_j^K , задействованных для решения общей задачи, которая описывается вектор-функцией:

$$S_k(t) = \{B_k(t)\} = \langle \{D\}_1(t) \cup \{D\}_2(t) \cup \dots \cup \{D\}_N(t) \rangle, \quad (13)$$

а изменение этой структуры в зависимости от условий (выражения 1, 2, 6) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{S}_k(t) = f(E(t), Q(t), B(t), t). \quad (14)$$

Таким образом, при децентрализованном групповом управлении комплексами $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$ в зависимости от изменяющихся с течением времени внешних и внутренних условий происходит адаптация структуры группы РТК ВН путём выработки распределённой системой управления решения, реализуемым определённым типом взаимодействия (роевым, стайным или коллективным) комплексов.

Целью группового управления комплексов $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$ на интервале времени $[t_0, t_k]$ является формирование распределённой системой управления комплексами такой структуры, с учётом ограничений (1), (5), (9), при которой организуется качественное взаимодействие комплексов $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$, обеспечивающих эффективное выполнение СРТ общей групповой задачи в различных режимах функционирования.

Тогда, на основе закона открытого управления [15] процедура взаимодействия комплексов, максимизирующая целевую функцию системы $\mathfrak{J}_{gr}(B)$ на множестве решений, принимаемых комплексами, удовлетворяющих условиям совершенного согласования.

Имеет место следующий факт: для того, чтобы решение каждого комплекса являлось доминантной стратегией комплексов, необходимо и достаточно, чтобы механизм группового взаимодействия был механизмом открытого управления [17–19], тогда, для режимов «А», «Б», «В», соответственно функционал качества системы определяется выражением (15):

$$\mathfrak{J}_{gr}(B) = \begin{cases} \int_{t_0}^{t_k} f(Q(C), E(C), Y(C), S(C), t) dt \rightarrow \underset{y \in Y(C)}{Arg \sup}(y, C); \\ \int_{t_0}^{t_k} f(Q(P_{nop.}), E(P_{nop.}), Y(P_{nop.}), S(P_{nop.}), t) dt; \rightarrow \underset{y \in Y(P_{nop.})}{Arg \sup}(y, P_{nop.}); \\ \int_{t_0}^{t_k} f(Q(t), E(t), Y(t), S(t), t) dt \rightarrow \underset{y \in Y(t)}{Arg \sup}(y, t). \end{cases} \quad (15)$$

Основное назначение адаптивного группового управления РТК при различных режимах функционирования состоит в том, чтобы обеспечить скоординированное поведение комплексов на коммуникативном уровне при решении общей и/или своих частных задач в априори неопределённой среде

Архитектура системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами представлена на рис. 1.

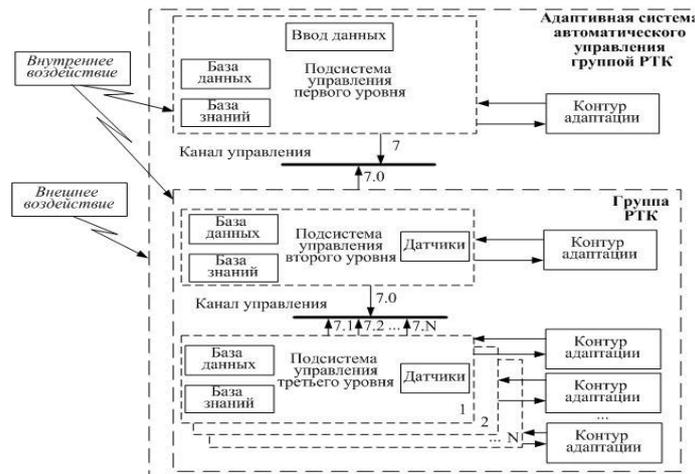


Рис. 1. Способ адаптивного группового управления робототехническими комплексами

На основании представленного подхода к синтезу архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами [20], требованиями к системе группового управления и задачами, решаемыми группой РТК [21], разработанного алгоритма и программы ЭВМ группового поведения РТК [22] и сформирован вариант облика системы робототехнической.

Заключение. Предложенный подход к синтезу архитектур системы адаптивного группового управления РТК предназначен для достижения основной цели адаптивного управления сложной системой – максимизации качества её функционирования, решения проблемы, состоящей из совокупности задач: формализации и описания процесса автоматического управления состоянием системы, автоматической оценки состояния системы по результатам наблюдения, автоматической идентификации характеристик системы, а также автоматического формирования управляющих команд по изменению её состояния и структуры в условиях недетерминированной динамической среды.

В процессе функционирования системы группового управления контуры адаптации, обеспечивающие решение проблемы управления качеством функционирования подсистем управления, оценивают состояние каждой подсистемы управления в условиях неопределённости, вызванной недостатком априорных сведений об истинном состоянии и состоянием динамической внешней среды.

Предложенный формализованный подход к синтезу «плавающей» архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами в условиях недетерминированной динамической среды позволит ускорить разработку робототехнических систем, реализующих адаптивное групповое управление РТК, предназначенных для решения задач охраны критически важных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савин Л.В.* Вариант будущей войны: роение боевых роботов // Стратегическая стабильность. - 2017. - № 1 (78). – С. 24-35.
2. Стратегическое ракетное вооружение. Методология, опыт, проблемы. Кн. 1. – М.: 4ЦНИИ, 2003. – 652 с.
3. Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года N 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации". - <http://docs.cntd.ru/document/902287707>.
4. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 ИСО 8373.2012. Роботы и робототехнические устройства.
5. *Городецкий В.И., Лебедев А.Н.* Планирование и составление расписаний автоматическое удовлетворение ограничений на временную структуру процесса // Проблемы информатизации. – 1994. – № 3-4. – С. 49-55.
6. Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах / под. ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. - 305 с.
7. *Пантелеев М.Г.* Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени // XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 октября 2014 г., Казань, Россия): Тр. конференции. В 3-т. Т. 1. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 323-333.
8. *Maes P.* Agent that Reduce Work and Information Overload // Communication of the ACM. – July 1994. – Vol. 37, No. 7. – P. 30-40.
9. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы. – 2014. – 34 с.
10. *Wooldridge M. and Jennings N.* Towards a Theory of Cooperative Problem Solving.
11. *Wooldridge M. and Jennings N.R.* Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey // Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994, (Eds. M.J. Wooldridge and N.R. Jennings): Proceedings. – Springer Verlag, 1994. – P. 3-39.

12. *Luce and Raiffa H.* Games and Decisions, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1957.
13. *Варшавский В.И., Поспелов Д.А.* Оркестр играет без дирижера. – М.: Наука 1984.
14. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
15. *Капустян С.Г.* Многоуровневая организация коллективного взаимодействия в группах интеллектуальных роботов // Известия ТРТУ. – 2004. – № 9. – С. 149-158.
16. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Распределенные системы планирования действий коллективов роботов: монография. – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
17. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с.
18. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
19. *Петраков С.Н.* Механизмы планирования в активных системах: неманипулируемость и множества диктаторства. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 135 с.
20. *Свиридов В.В., Свиридова Ю.А.* Способ адаптивного группового управления робототехническими комплексами и система для его осуществления // Патент на изобретение №2758870 от 02 ноября 2021 г.
21. *Свиридов В.В.* Методический подход к рациональному применению разнородных робототехнических комплексов для решения задач охраны и обороны критически важных объектов РВСН от воздействия диверсионно-разведывательных групп противника // Военная мысль. – 2021. – № 6. – С. 57-64. – ISSN 0236-2058.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614057 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Расчёт адаптивного группового управления робототехническими комплексами военного назначения на основе гибкости структуры системы управления к изменяющимся внешним условиям, с оценкой боевой эффективности» / Свиридов В.В., Повшенко Г.Т., Федосеенко Н.В. (RU). – Заявка №2020612894 ; дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.03 2020 г.

REFERENCES

1. Savin L.V. Variant budushchey voyny: roenie boevykh robotov [Variant of future war: swarming of fighting robots], *Strategicheskaya stabil'nost'* [Strategic stability], 2017, No. 1 (78), pp. 24-35.
2. Strategicheskoe raketnoe vooruzhenie. Metodologiya, opyt, problem [Strategic missile armament. Methodology, experience, problems]. Book 1. Moscow: 4TSNII, 2003, 652 p.
3. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 iyulya 2011 goda N 899 "Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii" [The decree of the President of the Russian Federation of July 7, 2011 N 899 "About the statement of the priority directions of development of science, technologies and equipment in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation"]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902287707>.
4. GOST R 60.0.0.4-2019 ISO 8373.2012. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva [GOST P 60.0.0.4-2019 ISO 8373.2012. Robots and robotic devices].
5. *Gorodetskiy V.I., Lebedev A.N.* Planirovanie i sostavlenie raspisaniy avtomaticheskoe udovletvorenie ogranicheniy na vremennuyu strukturu protsessa [Planning and drawing up schedules automatic satisfaction of restrictions on temporary structure of process], *Problemy informatizatsii* [Informatization problems], 1994, No. 3-4, pp. 49-55.
6. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennykh sredakh [Group management of mobile objects in uncertain environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p.
7. *Panteleev M.G.* Formal'naya model' operezhayushchego interaktivnogo planirovaniya deystviy intellektual'nykh agentov real'nogo vremeni [Formal model of the advancing interactive planning of actions of intellectual agents of real time], *XIV natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014 (24-27 oktyabrya 2014 g., Kazan', Rossiya): Tr. Konferentsii* [XIV national conference on artificial intelligence with the international participation of KII-2014 (on October 24-27, 2014, Kazan, Russia): Conference works]. In 3 vol. Vol. 1. Kazan': Izd-vo RITS «Shkola», 2014, pp. 323-333.

8. *Maes P.* Agent that Reduce Work and Information Overload, *Communication of the ACM*, July 1994, Vol. 37, No. 7, pp. 30-40.
9. *Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V.* Mnogoagentnye sistemy [Mnogoagentnye of system], 2014, 34 p.
10. *Wooldridge M. and Jennings N.* Towards a Theory of Cooperative Problem Solving.
11. *Wooldridge M. and Jennings N.R.* Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey, *Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994*, (Eds. M.J. Wooldridge and N.R. Jennings): Proceedings. Springer Verlag, 1994, pp. 3-39.
12. *Luce and Raiffa H.* Games and Decisions, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1957.
13. *Varshavskiy V.I., Pospelov D.A.* Orkestr igraet bez dirizhera [The orchestra plays without conductor]. Moscow: Nauka 1984.
14. *Novikov D.A.* Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI, 2005, 584 p.
15. *Kapustyan S.G.* Mnogourovnevaya organizatsiya kollektivnogo vzaimodeystviya v gruppakh intellektual'nykh robotov [Multilevel organization of collective interaction in groups of intelligent robots], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 9, pp. 149-158.
16. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Raspredelemnnye sistemy planirovaniya deystviy kollektivov robotov: monografiya [The distributed systems of planning of actions of collectives of robots [Text] the monograph]. Moscow: YANUS-K, 2002, 292 p.
17. *Burkov V.N.* Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh system [Bases of the mathematical theory of active systems]. Moscow: Nauka, 1977, 255 p.
18. *Burkov V.N., Novikov D.A.* Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy [Theory of active systems: state and prospects]. Moscow: SINTEG, 1999, 128 p.
19. *Petrakov S.N.* Mekhanizmy planirovaniya v aktivnykh sistemakh: nemanipuliruemost' i mnozhestva diktatorstva [Planning mechanisms in active systems: nonmanipulability and sets of dictatorship]. Moscow: IPU RAN, 2001, 135 p.
20. *Sviridov V.V., Sviridova Yu.A.* Sposob adaptivnogo gruppovogo upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami i sistema dlya ego osushchestvleniya [Sposob of adaptive group management of robotic complexes and system for its implementation], Patent for the invention No. 2758870 of November 02, 2021.
21. *Sviridov V.V.* Metodicheskii podkhod k ratsional'nomu primeneniyu raznorodnykh robototekhnicheskikh kompleksov dlya resheniya zadach okhrany i oborony kriticheskikh vazhnykh ob"ektov RVSN ot vozdeystviya diversionno-razvedyvatel'nykh grupp protivnika [Methodical approach to rational application of diverse robotic complexes for the solution of problems of protection and defense of crucial objects of RVSN against influence of diversionary and prospecting groups of the opponent], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2021, No. 6, pp. 57-64. ISSN 0236-2058.
22. *Sviridov V.V., Povshenko G.T., Fedoseenko N.V. (RU).* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020614057 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya EVM «Raschet adaptivnogo gruppovogo upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami voennogo naznacheniya na osnove gibkosti struktury sistemy upravleniya k izmenyayushchimsya vneshnim usloviyam, s otsenkoy boevoy effektivnosti» [Certificate on the state registration of the computer program No. 2020614057 Russian Federation. The computer program "Calculation of adaptive group management of military robotic complexes on the basis of flexibility of structure of a control system to the changing external conditions, with an assessment of fighting efficiency"]. Demand No. 2020612894; date of registration in the Register of the computer programs 26.03 2020.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Котов.

Свиридов Виктор Викторович – Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого; e-mail: sviridov@list.ru; г. Серпухове, Россия; к.т.н.; с.н.с.

Sviridov Viktor Viktorovich – Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great; e-mail: sviridov@list.ru; Serpukhov, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Раздел II. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-89-97

Д.Е. Губарев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ГЕНЕРАТОР С КООКСИАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Автогенераторы нашли широкое применение в приёмно-передающей аппаратуре связи, навигации и радиолокации, так как определяют их стабильность, мощность и другие важные параметры. Объектом исследования в данной работе является гетеродин из состава анализатора спектра С4-60. Поскольку техническое описание этого прибора не содержит ряд важных параметров, целью исследования является исследование выбега частоты, зависимости частоты от напряжения питания, уровня гармоник. Приведены принципиальная схема и краткое описание конструкции генератора. Проведено моделирование коаксиального резонатора в пакете Microwave Office. Приведена амплитудно-частотная характеристика резонатора. Представлены результаты экспериментального исследования автогенератора. Дана оценка паразитных параметров в спектре выходного сигнала. Измерены выбег частоты и модуляционная характеристика по цепи питания. Эти данные позволяют предъявить обоснованное требование к стабильности питающего напряжения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании приёмно-передающей аппаратуры связи, навигации, радиоэлектронной борьбы. Статья может быть полезна студентам и преподавателям учебных заведений при учебном проектировании приёмно-передающей аппаратуры. Достигнуты следующие электрические параметры: – рабочая частота $1500 \pm 1,5$ МГц; – выходная мощность не менее 13 дБм; – напряжение питания минус 12,6 В; – ток потребления не более 60 мА; – выбег частоты за 24 минуты после включения не более 325 кГц; – уход частоты при изменении напряжения от минус 5 В до минус 13 В не более 241 кГц.

Генератор; стабилизированный коаксиальным резонатором; эксперимент; модуляционная характеристика; выбег частоты; ширина спектра; уровень гармоник.

D.E. Gubarev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

GENERATOR WITH COAXIAL RESONATOR

Autogenerators have found wide application in the receiving and transmitting equipment of communication, navigation and radar, as they determine their stability, power and other important parameters. The object of research in this work is a 1.5 GHz heterodyne from the C4-60 spectrum analyzer. Since the technical description of this device does not contain a number of important parameters, the purpose of the study is to study the frequency run-out, the frequency dependence on the supply voltage, the harmonic level. A schematic diagram and a brief description of the generator design are given. The simulation of a coaxial resonator in the Microwave Office package is carried out. The amplitude-frequency characteristic of the resonator is given. The results of an experimental study of a 1.5 GHz autogenerator are presented. The estimation of parasitic parameters in the spectrum of the output signal is given. The frequency run-out and modulation characteristic along the power supply circuit were measured. These data allow us to make a reasonable requirement for the stability of the supply voltage. The results obtained can be used in the design of receiving and transmitting communication equipment, navigation, electronic warfare. The article may be useful for students and teachers of educational institutions in the educational design of

receiving and transmitting equipment. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency 1500 ± 1.5 MHz; – output power of at least 13 dBm; – supply voltage minus 12.6 V; – consumption current no more than 60 mA; – frequency run-out in 24 minutes after switching on no more than 325 kHz; – frequency departure when the voltage changes from minus 5 V to minus 13 V no more than 241 kHz.

Generator stabilized by a coaxial resonator; experiment; modulation characteristic; frequency run-out; spectrum width; harmonic level.

Введение. Стабилизация частоты генераторов СВЧ является актуальной задачей с 30-х годов 20 века по настоящее время. Наличие обширной литературы, в том числе монографий [1, 2], учебных пособий [3, 6], статей [7], патентов [8], диссертаций [9–15], подтверждает значимость и необходимость проведения исследований по данному вопросу.

Целью данной работы является исследование транзисторного генератора СВЧ, стабилизированного коаксиальным резонатором. Объектом исследования является автогенератор 1,5 ГГц из состава анализатора спектра С4-60 [16, 17].

Выбор коаксиального резонатора в данном случае связан с тем, что другие способы стабилизации частоты 1,5 ГГц существенно сложнее. Например, кварцевая стабилизация частоты требует многократного умножения частоты [5, 11]. Стабилизация частоты диэлектрическим резонатором затруднена в связи с тем, что серийные диэлектрические резонаторы не выпускаются на частоту 1,5 ГГц [13]. Стабилизация частоты фильтром или линией задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) возможна, если доступна субмикронная технология [15]. Однако для большинства предприятий приборостроительного профиля эта технология недоступна.

Схема и конструкция. Автогенератор на частоту 1,5 ГГц построен по схеме, показанной на рис. 1. Активным элементом генератора является транзистор Т1 типа 2Т640А2 [18]. Его коллектор заземлён, эмиттер связан с коаксиальным резонатором Э1, а выход сделан из цепи базы. В цепи питания установлен трёхзвенный фильтр нижних частот. Смещение на базу обеспечивает делитель напряжения на резисторах R2, R3. Фото генератора со снятой крышкой можно видеть на рис. 2.

Резонатор представляет собой отрезок коаксиальной линии, закороченный с одной стороны, и имеющий ёмкостной зазор h1 с крышкой с другой стороны (рис. 3). Резонансную частоту резонатора можно подстраивать в небольших пределах изменением расстояния h1. Корпус резонатора изготовлен из инвара и покрыт серебром. Для повышения добротности резонатора его внутренние поверхности рекомендуется полировать.

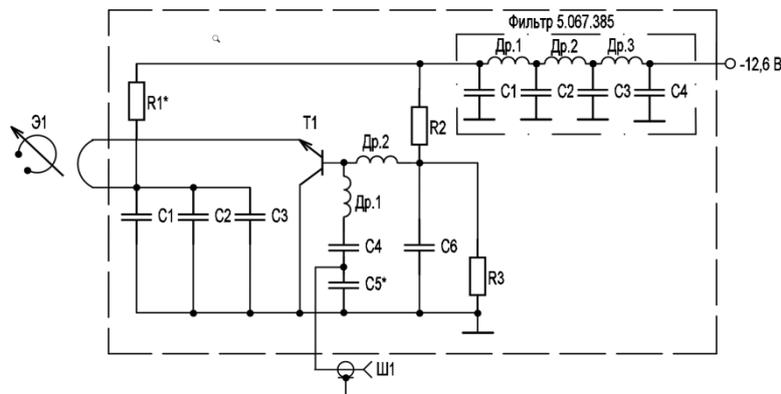


Рис. 1. Принципиальная схема генератора 1,5 ГГц

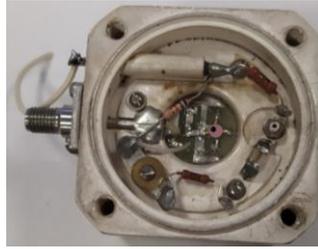


Рис. 2. Фото генератора со снятой крышкой со стороны активной части



Рис. 3. Фото генератора со снятой крышкой со стороны коаксиального резонатора

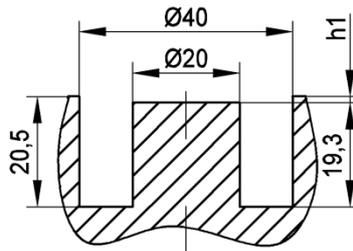


Рис. 4. Резонатор в разрезе с размерами

Моделирование резонатора. Моделирование резонатора проводилось с целью определения ёмкости, включенной между центральным проводником резонатора и его крышкой. Моделирование резонатора проводилось в среде Microwave Office [19, 20] (MWO). Отличительной особенностью этой модели является ёмкостная связь резонатора с источником сигнала и нагрузкой, тогда как на рис. 1 связь резонатора с транзистором является индуктивной. Такая замена связана с тем, что в MWO связанные линии должны быть одинаковыми. Модель резонатора приведена на рис. 5. Подключение источника сигнала и нагрузки к коаксиалу осуществляется на расстоянии 2 мм от заземленного конца. Настройка резонатора на частоту 1,5 ГГц осуществлялась путём вариации ёмкости между разомкнутым концом центрального проводника и крышкой. Удовлетворительный результат настройки резонатора на частоту 1,5 ГГц был получен при ёмкости $C1 = 3,67$ пФ. При этом резонансная кривая имеет вид, показанный на рис. 6.

Первый эксперимент проводился по измерению выбега частоты после включения с шагом в 1 минуту. Результаты измерения частоты заносились в таблицу 1. По данным табл. 1 построен график на рис. 8. Из этого рисунка видно, что температурный коэффициент частоты (ТКЧ) положительный. Среднее значение скорости дрейфа частоты за 24 минуты составляет 13,54 кГц/мин.

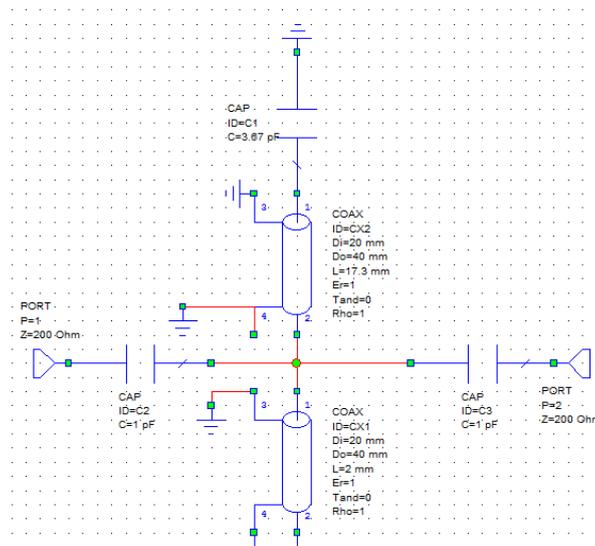


Рис. 5. Модель резонатора

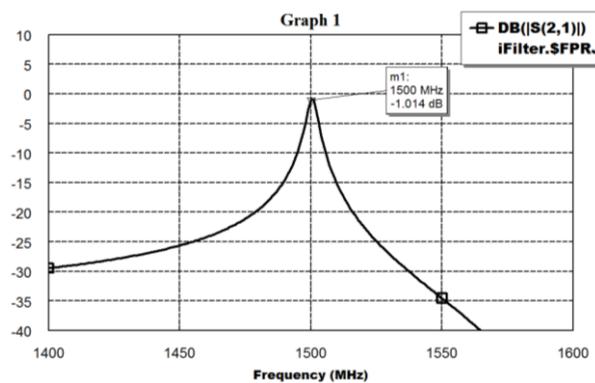


Рис. 6. АЧХ резонатора

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 7.

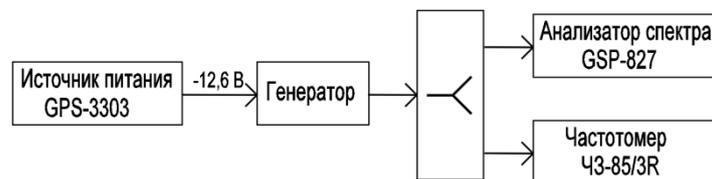


Рис. 7. Структурная схема измерительной установки

Второй эксперимент проводился для снятия модуляционной характеристики генератора по питанию. Результаты измерений заносились в табл. 2. Измерения проводились для $U_{пит}$ от 6 до 13 В с шагом 1 В. По данным табл. 2 выполнен график на рис. 9. Из этого графика видно, что средняя крутизна модуляционной характеристики составляет 34,43 кГц/В.

Таблица 1

Выбег частоты

t, мин	f _{вых} , ГГц	t, мин	f _{вых} , ГГц
5	1.498769	18	1.498973
6	1.498790	19	1.498984
7	1.498812	20	1.498997
8	1.498827	21	1.499009
9	1.498850	22	1.499020
10	1.498860	23	1.499031
11	1.498873	24	1.499042
12	1.498889	25	1.499053
13	1.498903	26	1.499064
14	1.498917	27	1.499074
15	1.498931	28	1.499084
16	1.498945	29	1.499094
17	1.498959		

Таблица 2

Зависимость частоты от напряжения питания

Упит, В	f _{вых} , ГГц
- 6	1.499069
- 7	1.499137
- 8	1.499188
- 9	1.499232
- 10	1.499261
- 11	1.499285
- 12	1.499300
- 13	1.499310

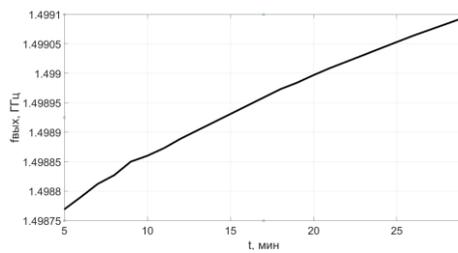


Рис. 8. Выбег частоты

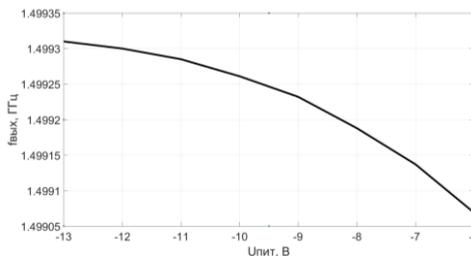


Рис. 9. Зависимость частоты генератора от напряжения питания

В третьем эксперименте проводилось фотографирование спектра выходного сигнала. На рис. 10 представлен спектр трёх гармоник выходного сигнала и их абсолютный уровень. На рис. 10 хорошо заметно, что уровень второй гармоники ниже уровня третьей, так как угол отсечки для последней более оптимален.

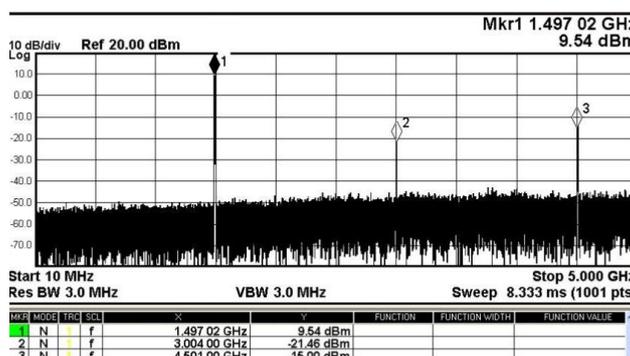


Рис. 10. Спектр выходного сигнала

В табл. 3 приводится сравнение заданных и измеренных параметров генератора.

Таблица 3

Основные параметры генератора

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Рабочая частота, МГц	1500 ± 1,5	1499
Выходная мощность, дБм	12,5	13
Выбег частоты за 24 минуты, кГц	–	325
Уход частоты при изменении напряжения питания от 6 до 13 В, кГц	–	241
Напряжение питания, В	-12,6	-12,6
Ток потребления, мА	60	40
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	50	50

Из этой таблицы видно, что все требования к генератору выполняются. Генератор рекомендуется использовать в качестве гетеродина.

Заключение. Генератор, стабилизированный коаксиальным резонатором на частоте около 1,5 ГГц, имеет следующие параметры:

- ◆ выбег частоты за 24 минуты после включения не более 325 кГц;
- ◆ уход частоты при изменении напряжения питания от минус 6 до минус 13 В составил 241 кГц;
- ◆ уровень второй гармоники ниже полезного сигнала на 31 дБ;
- ◆ уровень третьей гармоники ниже полезного сигнала на 24,54 дБ.

Показано достижение относительной нестабильности частоты порядка $\pm 10^{-4}$ /градус (резонатор из латуни). Дальнейшее повышение стабильности возможно путём применения более стабильных материалов резонатора – инвара, суперинвара, стабилитина, а также повышением добротности резонатора полированием.

Радикальное повышение стабильности частоты (на порядок и более) возможно при использовании других схемотехнических и технологических решений – путём умножения частоты кварцевого генератора, использованием резонаторов на поверхностных акустических волнах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
2. Шитиков Г.Т. Стабильные диапазонные автогенераторы. – М.: Сов. Радио, 1965. – 614 с.
3. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 176 с.
4. Гарматюк С.С. Задачник по устройствам генерирования радиосигналов: учеб. пособие. – М.: ДМК-Пресс, 2015. – 672 с.
5. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.
6. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
7. Бровченко С.П., Зикий А.Н., Чернышева О.А. СВЧ транзисторный автогенератор, стабилизированный диэлектрическим резонатором // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 182-184.
8. Патент США №3.866.144. Microwave Oscillator, Публ. 1975 г., 11 февраля. Т. 931, № 2. М. кл. H03B 7/14, НКИ 331 – 107G/.
9. Коробов О.Н. Широкополосные автогенераторы Ганна с ферритовыми резонаторами и распределённой связью: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1980.
10. Мусьянков М.И. Температурная и режимная нестабильность частоты одноконтурных и многоконтурных транзисторных автогенераторов: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1980.
11. Прокопенко В.Г. Исследование принципов построения высокостабильных интегральных кварцевых генераторов с нелинейным ограничением напряжения, приложенного к кварцевому резонатору: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТРТУ, 1995. – 24 с.
12. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МЭИ, 2004.
13. Соколов И.А. Разработка и исследование малощумящих источников колебаний СВЧ диапазона, стабилизированных диэлектрическими резонансными системами: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: 1996. – 165 с.
14. Станков Л.Р. Стабилизация частоты с помощью кольцевых диэлектрических резонаторов: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 1984. – 11 с.
15. Ляшук А.Н. Исследование и разработка стабильных ВЧ ударостойких генераторов на основе ПАВ компонентов: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: Омский госуд. технический университет, 2014.
16. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЭ1.406.056ТО. Ч. I.
17. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЭ1.406.056ТО. Ч. II. – 221 с.
18. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности СВЧ и их зарубежные аналоги. Справочник. – Т. 4. – М.: Куб К-а, 1997. – 544 с.
19. Бахвалова С.А., Романюк В.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
20. Разевиг Д.В., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

REFERENCES

1. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and HF radio measuring equipment. Node and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
2. Shitikov G.T. Stabil'nye diapazonnye avtogeneryatory [Stable range autogenerators]. Moscow: Sov. Radio, 1965, 614 p.
3. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Peredatchiki pomekh sovremennym sredstvam svyazi: ucheb. posobie [Transmitters of interference with modern means of communication: study guide]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 176 p.
4. Garmatyuk S.S. Zadachnik po ustroystvam generirovaniya radiosignalov: ucheb. posobie [Taskbook on devices for generating radio signals: textbook]. Moscow: DМК-Press, 2015, 672 p.

5. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Stabil'nost' chastoty generatorov SVCh: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: study guide]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
6. *Belov L.A.* Formirovanie stabil'nykh chastot i signalov: ucheb. posobie [Formation of stable frequencies and signals: textbook]. Moscow: Akademiya, 2005, 224 p.
7. *Brovchenko S.P., Zikiy A.N., Chernysheva O.A.* SVCh tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Microwave transistor generator stabilized by a dielectric resonator], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 182-184.
8. Patent SSHA №3.866.144. Microwave Oscillator, Publ. 1975 g., 11 fevralya, tom 931, №2. M. kl. N0ZV 7/14, NKI 331 – 107G/ [US Patent No.3.866.144. Microwave Oscillator, Publ. 1975, February 11, volume 931, No. 2. M. cl. N0ZV 7/14, NKI 331 - 107G/].
9. *Korobov O.N.* Shirokopolosnye avtogeneratory Ganna s ferritovymi rezonatorami i raspredelennoy svyaz'yu: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Gann broadband autogenerators with ferrite resonators and distributed communication: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 1980.
10. *Musyankov M.I.* Temperaturnaya i rezhimnaya nestabil'nost' chastoty odnokonturnykh i mnogokonturnykh tranzistornykh avtogeneratorov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Temperature and regime instability of the frequency of single-circuit and multi-circuit transistor generators: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 1980.
11. *Prokopenko V.G.* Issledovanie printsipov postroeniya vysokostabil'nykh integral'nykh kvartsevykh generatorov s nelineynym ogranicheniem napryazheniya, prilozhennogo k kvartsevomu rezonatoru: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the principles of construction of highly stable integral quartz generators with nonlinear voltage limitation applied to a quartz resonator: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog: TRTU, 1995, 24 p.
12. *Tsarapkin D.P.* Metody generirovaniya SVCh kolebaniy s minimal'nym urovnem fazovykh shumov: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of generating microwave oscillations with a minimum level of phase noise: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 2004.
13. *Sokolov I.A.* Razrabotka i issledovanie maloshumyashchikh istochnikov kolebaniy SVCH diapazona, stabilizirovannykh dielektricheskimi rezonansnymi sistemami: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of low-noise sources of microwave oscillations stabilized by dielectric resonant systems: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: 1996, 165 p.
14. *Stankov L.R.* Stabilizatsiya chastoty s pomoshch'yu kol'tsevykh dielektricheskikh rezonatorov: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Frequency stabilization using ring dielectric resonators: abstract, cand. of phys. and math. sc. diss.]. Moscow: MGU, 1984, 11 p.
15. *Lyashuk A.N.* Issledovanie i razrabotka stabil'nykh VCh udarostoykikh generatorov na osnove PAV komponentov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of stable HF shock-resistant generators based on surfactant components: cand. of eng. sc. diss.]. Omsk: Omskiy gosud. tekhnicheskiiy universitet, 2014.
16. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. EE1.406.056TO. Ch. I [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. EE1.406.056TO. Part I.
17. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. EE1.406.056TO. Ch. II [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. EE1.406.056TO. Part II], 221 p.
18. *Petukhov V.M.* Bipolyarnye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti SVCh i ikh zarubezhnye analogi. Spravochnik [Bipolar transistors of medium and high power microwave and their foreign analogues. Handbook]. Vol. 4. Moscow: Kub K-a, 1997, 544 p.
19. *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.
20. *Razevig D.V., Potapov Yu.V., Kurushin A.A.* Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office [Designing microwave devices using Microwave Office]. Moscow: Solon-Press, 2003, 496 p.

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

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89614132918; кафедра АиРПУ; аспирант.

Зикий Анатолий Николаевич – e-mail: zikiy50@mail.ru; 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.

Gubarev Dmitry Egorovich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79614132918; the department of A&RPU; post-graduate student.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – e-mail: zikiy50@mail.ru; 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: +79896270939; master; design engineer of the 2nd category.

УДК 621.382.3

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-97-106

П.Г. Грицаенко, Л.А. Светличная

ЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ СБИС НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С P-N-ПЕРЕХОДАМИ

В 80-е годы прошлого столетия в качестве элементной базы широко применялась интегральная инжекционная логика (И²Л). Несколько позднее в развитие возможностей И²Л для построения СБИС появилась инжекционно-полевая логика (ИПЛ). Благодаря применению в качестве ключевого элемента инвертора полевого транзистора, в данном элементном базисе удалось существенно сократить важный для СБИС показатель – потребляемую мощность – достигнув пиковаттного диапазона. Еще большее снижение потребляемой мощности может быть достигнуто использованием в элементарной ячейке инвертора двух полевых транзисторов, которое предлагается в настоящей работе. Данный элементный базис предложено называть полевой-полевой логикой, или в дальнейшем П²Л. Для снижения габаритов П²Л-ячейки полевые транзисторы, как ключевой, так и нагрузочный, выполнены с вертикальным каналом. Кроме того, для обеспечения положительного напряжения питания в качестве ключевого используется n-канальный транзистор, в качестве нагрузочного – p-канальный транзистор. Оба транзистора являются нормально закрытыми, т.е. закрыты при нулевом напряжении на затворе каждого из них. Рассмотрены топологические варианты выполнения П²Л-ячейки от геометрии с кольцевыми затворами до геометрии с линейными затворами. Топологическими нормами, принятыми в рассмотрении, являются нормы 50 нм. Потребляемая мощность в данном элементном базисе снижена по сравнению с ИПЛ примерно в два раза, благодаря тому, что ток через нагрузочные транзисторы, так же, как и через ключевые, в цепочке инверторов протекает через один инвертор. Рассмотрен технологический процесс изготовления П²Л-ячейки, рассчитаны профили распределения примесей по глубине. Технологический процесс изготовления разработан с учетом того, что нагрузочный p-канальный транзистор должен быть выполнен в изолированном кармане по технологии полной диэлектрической изоляции. Приведены технологические режимы изготовления П²Л-ячейки. Предлагаемый конструктивно-технологический вариант П²Л-ячейки может быть рекомендован для создания СБИС с низкой потребляемой мощностью.

Инжекционно-полевая логика; интегральная инжекционная логика; полевая-полевая логика; профиль распределения примеси; плотность компоновки; потребляемая мощность.

P.G. Gritsaenko, L.A. Svetlichnaya

LOGIC CELL FOR VLSI BASED ON FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH P-N JUNCTIONS

In the 80s of the last century, integrated injection logic (I^2L) was widely used as an element base. Somewhat later, injection-field logic (IPL) appeared in the development of I^2L capabilities for building VLSI. Thanks to the use of a field-effect transistor as a key element of the inverter, in this element basis it was possible to significantly reduce an important indicator for VLSI – power consumption - reaching the peak-watt range. An even greater reduction in power consumption can be achieved by using two field-effect transistors in the inverter unit cell, which is proposed in this paper. This element basis is proposed to be called field-field logic, or in the future P^2L . To reduce the dimensions of the P^2L cell, field-effect transistors, both key and load, are made with a vertical channel. In addition, to ensure a positive supply voltage, an n-channel transistor is used as a key one, and a p-channel transistor is used as a load one. Both transistors are normally closed, i.e. closed at zero gate voltage. Topological variants of P^2L -cell execution from geometry with annular gates to geometry with linear gates proposed by the author earlier are considered. The topological norms adopted in the consideration are the norms of 50 nm. The power consumption in this element basis is reduced by about two times compared to the IPL, due to the fact that the current flows through the load transistors in the inverter chain through one inverter, as well as through the key ones. The technological process of manufacturing a P^2L cell is considered, the profiles of the distribution of impurities in depth are calculated. The manufacturing process is designed taking into account the fact that the load p-channel transistor must be made in an insulated pocket using full dielectric insulation technology. The technological modes of manufacturing the P^2L cell are given. The proposed design and technological variant of the P^2L cell can be recommended for the creation of VLSI with low power consumption.

Injection-field logic; integral injection logic; field-field logic; impurity distribution profile; layout density; power consumption.

Введение. Инжекционно-полевая логика (ИПЛ) [1–3] наряду с интегральной инжекционной логикой (I^2L) [4–13] были актуальными направлениями создания БИС и СБИС в 80-е годы прошлого столетия.

Тем не менее неоспоримые преимущества БИС на МОП-транзисторах вытеснили эти элементные базы с производственных площадок фирм производителей интегральных схем.

Постановка задачи. В работе [14] утверждалось, что с применением технологии самосовмещения и при использовании оригинального топологического решения ячейки ИПЛ с линейными затворами БИС на основе ИПЛ, имея пиковаттный уровень потребляемой мощности, могут конкурировать с БИС на основе МОП-транзисторов.

Тем не менее логические элементы как ИПЛ, так и I^2L наряду с преимуществами, позволяющими их применение в СБИС, имеют существенный недостаток: постоянное потребление тока во включенном и выключенном состоянии ключевого элемента.

Формулировка задачи. В данной работе предлагается конструкция, которая позволяет избежать данного недостатка. Ячейка полевой логики, в дальнейшем P^2L состоит из двух полевых транзисторов с затворами в виде р-п-переходов с каналами противоположных типов проводимости. Схема и топология ячейки P^2L приведена на рис. 1.

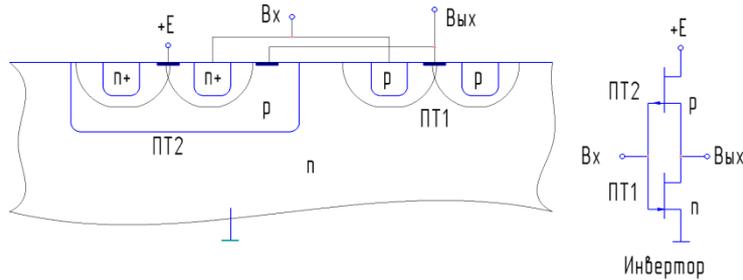


Рис. 1. Схема и топология ячейки П²Л

Входящие в ячейку П²Л транзисторы ПТ1 и ПТ2 являются нормально закрытыми, т.е. они закрываются при нулевом напряжении затвор-исток любого из них. Закрытие транзисторов происходит благодаря перекрытию объемных зарядов р-п-переходов от правой и левой половин затвора.

Как видно из рисунка, оба полевых транзистора имеют каналы вертикального типа.

Напряжение питания П²Л +Е как в ИПЛ и И²Л равно напряжению прямо смещенного р-п-перехода.

Возможные конструктивно-схемотехнические варианты реализации П²Л-элементов представлены на рис. 2, 3.

Первые два варианта являются инверторами, то есть при подаче высокого уровня на вход - на выходе установится низкий уровень и наоборот. Оба транзистора в данных вариантах являются нормально закрытыми.

Два варианта, изображенных на рис. 3, представляют собой повторители: при подаче высокого уровня на вход на выходе устанавливается также высокий, при подаче низкого - низкий. В данных вариантах оба транзистора - р-канальный и п-канальный - являются нормально открытыми.

В каждом из вариантов есть подварианты с положительным напряжением питания +Е и отрицательным напряжением питания -Е.

С точки зрения применения в интегральных логических схемах интерес представляют только инверторы и схемы с положительным напряжением питания, поэтому в дальнейшем будет рассматриваться вариант инвертора, изображенный на рис. 2 с положительным напряжением питания.

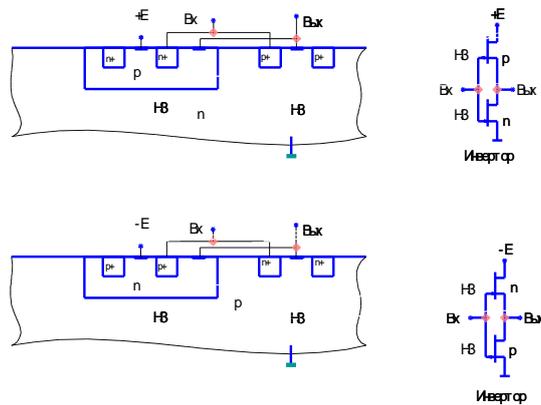


Рис. 2. Конструктивно-схемотехнический вариант реализации П²Л-элемента на нормально закрытых транзисторах

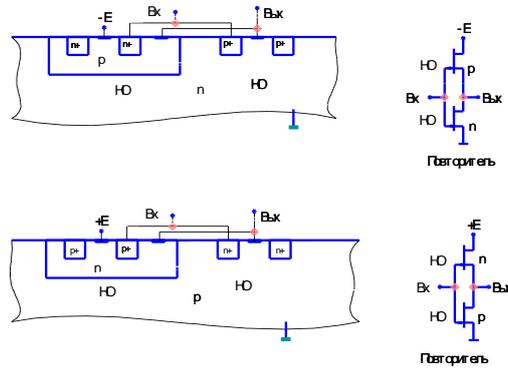


Рис. 3. Конструктивно-схематический вариант реализации П²Л-элемента на нормально открытых транзисторах

Необходимо также учесть, что положительное напряжение питания, приложенное к стоку р-канального транзистора, вызывает постоянное протекание тока прямосмещенного перехода по цепи: питание +Е – «общий провод».

Для исключения этого необходимо ввести изоляцию n-канального транзистора. Вариант П²Л-элемента с окисной изоляцией р-канального транзистора приведен на рис. 4.

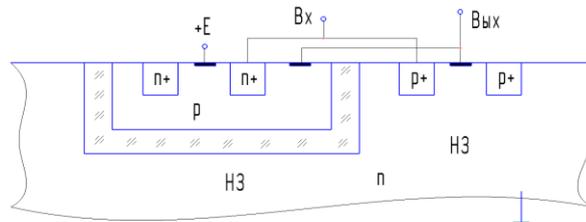


Рис. 4. Вариант П²Л-элемента с окисной изоляцией

Схема многовходового элемента ЗИЛИ-НЕ на основе данного элемента П²Л представлена на рис. 5.

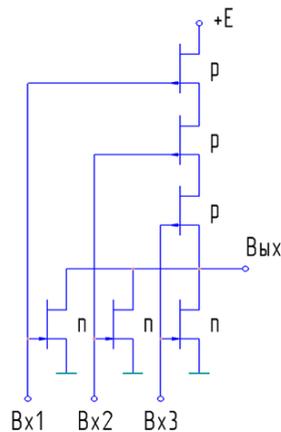


Рис. 5. Схема элемента ЗИЛИ-НЕ на основе П²Л

Конструктивно-технологический вариант элемента ЗИЛИ-НЕ на основе П²Л представлен на рис. 6.

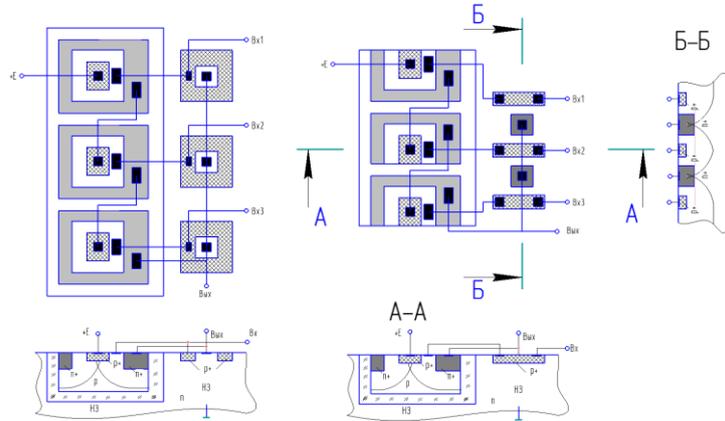


Рис. 6. Конструктивно-технологический вариант элемента ЗИЛИ-НЕ на основе П²Л

На правом рисунке изображен вариант с топологической модификацией блока n-канальных транзисторов с использованием подхода самосовмещения областей, описанного в [1].

Распространение данного подхода также на область p-канальных транзисторов позволяет еще больше сократить площадь, занимаемую схемой, что показано на рис. 7.

Распределение примесей на этапах формирования структуры может быть рассчитано по следующим соотношениям.

Распределение примеси $N(x, t)$ по глубине x с течением времени t на этапе загонки рассчитывается по известной формуле [2]:

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1)$$

где N_s – постоянная концентрация примеси, поддерживаемая на поверхности в процессе загонки; D – коэффициент диффузии примеси.

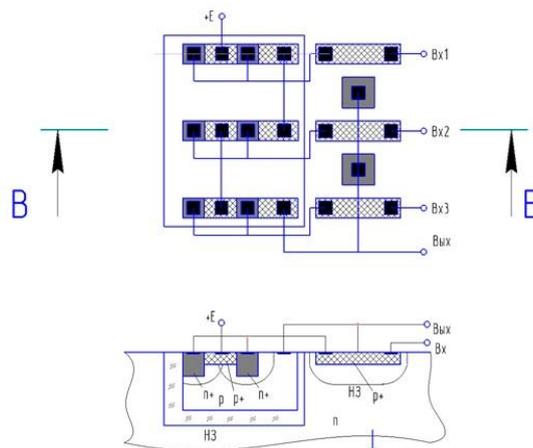


Рис. 7. Конструкция П²Л-элемента с самосовмещением областей p-канальных транзисторов

Интегральное количество примеси P_0 , введенное на этапе загонки, может быть определено по формуле:

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_s \sqrt{Dt}. \quad (2)$$

В планарной технологии диффузию проводят в два этапа. При расчете технологического режима первого этапа диффузии, выполняемой из бесконечного источника примеси, требуется при заданной температуре диффузии T_s , поверхностной концентрации диффузанта N_s и концентрации атомов примеси в исходном материале N_ϕ определить время диффузии, при котором обеспечивается заданная толщина диффузионного слоя. Для окончательного формирования диффузионной области введенную на первом этапе примесь подвергают перераспределению. Этот второй этап диффузии, называемый разгонкой примеси, соответствует диффузии из конечного (или ограниченного) источника примеси.

Распределение концентрации примеси в процессе разгонки описывается следующим выражением:

$$N(x, t) = \frac{P_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (3)$$

Основным требованием при формировании профиля распределения примесей является достижение глубины переходов не более 50 нм.

При расчете распределения концентрации примеси использовались технологические параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Загонка бора	Разгонка бора	Загонка фосфора
Температура загонки, °С	1000	1200	970
Время загонки (разгонки), с	55	3105	22
Глубина загонки (разгонки), нм	100	150	20

Профиль распределения примесей в поперечном сечении P^2L -элемента представлен на рис. 8.

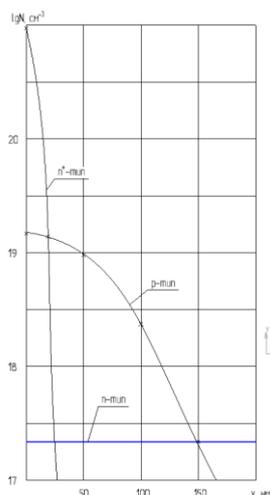


Рис. 8. Профиль распределения примеси в поперечном сечении P^2L -элемента

Для обеспечения минимальных топологических размеров, что определяется шириной объемных зарядов переходов, концентрация примеси в подложке n-типа должна быть достаточно высокой. С этой целью выбираем $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Ввиду малой глубины залегания переходов модели их близки к модели резкого перехода. Ширина объемного заряда резкого перехода при нулевом напряжении определяется по формуле:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\varphi_k}{qN}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 12$ – диэлектрическая проницаемость кремния;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$ – диэлектрическая постоянная;

$\Delta\varphi_k \approx 0,6 \text{ В}$ – контактная разность потенциалов;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона;

N – концентрация примеси в полупроводнике.

Рассчитанные по формуле (4) ширины объемных зарядов затворов р-канального и n-канального транзисторов равны соответственно:

$$l_p = 60 \text{ нм}; \quad l_n = 10 \text{ нм}.$$

Преимуществом данного подхода по сравнению ИПЛ-логикой является снижение потребляемой мощности примерно в два раза. Это можно пояснить на примере цепочки инверторов, приведенной на рис. 9.

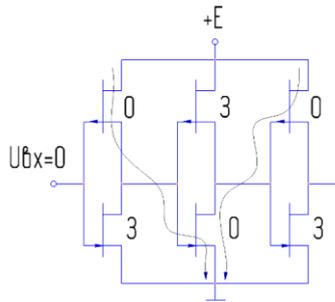


Рис. 9. Цепочка инверторов на основе P^2L -элементов

Условные обозначения на рисунке:

0 – транзистор открыт; 3 – транзистор закрыт.

Как видно, ток в нагрузочных транзисторах (изображен тонкой линией) в данном элементном базисе протекает через один инвертор, в отличие от ИПЛ-базиса, в то время как ток инжектора в ИПЛ-базисе течет независимо от того, открыт ключевой транзистор или закрыт.

Практическим способом реализации структуры, изображенной на рис. 7, является способ формирования изолирующего барьерного слоя высокодозным легированием ионами азота или кислорода, являющегося дном «кармана», описанный в [15–20], с последующим созданием боковых окисных стенок по IPOS-методу. При этом для формирования слоя SiO_2 используют дозу легирования ионами кислорода $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ или азота $-(5-7) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ при формировании слоя Si_3N_4 . При внедрении ионов азота отжиг легированных слоев осуществляют при температурах 1150–1250 °С в течение 6–10 ч. Отжиг слоев, легированных ионами кислорода, осуществляют при температурах 1250–1350 °С в различных средах (аргон, кислород или их смеси).

Заключение. В работе рассмотрены варианты выполнения интегральных структур на основе двух полевых транзисторов с вертикальными каналами с точки зрения их реализации в СБИС. Из рассмотренных вариантов транзисторов с нормально закрытыми и нормально открытыми транзисторами с разной полярностью напряжения питания выбран вариант реализации П²Л-структуры на основе нормально закрытых транзисторов разного типа проводимости с положительным напряжением питания.

Рассмотрены конструктивно-технологические варианты реализации П²Л-структуры в том числе с использованием технологии самосовмещения.

Разработан вариант технологии изготовления П²Л-структуры, обеспечивающий необходимый профиль распределения примеси с учетом физико-топологических особенностей структуры (размеры выбираются в зависимости от концентрации примесей, определяющих ширину объемных зарядов р-п-переходов).

Предложен вариант реализации структуры, в котором для создания боковых изолирующих стенок используется легирование ионами кислорода или азота с последующим отжигом IPOS-методом. В данном варианте использование пористого кремния позволяет значительно сократить время изготовления, увеличить скорость окисления и снизить затраты на изготовление.

Преимуществом предложенной конструкции логической ячейки на основе полевых транзисторов с р-п-переходами по сравнению с существующими вариантами И²Л и ИПЛ-структур является то, что ее применение позволяет снизить потребляемую мощность примерно в два раза за счет исключения постоянного потребления тока ключевым элементом во включенном и выключенном состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аваев Н.А., Дулин В.Н., Наумов Ю.Е.* Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. – М.: Сов.радио, 1977. – 248 с.
2. *Баринюв В.В., Кремлев В.Я., Мошкин В.И., Орликовский А.А.* Интегральные схемы с инжекционным питанием // Зарубежная электронная техника. – 1973. – № 19. – С. 3.
3. *Кремлев В.Я., Мошкин В.И.* Функционально-интегрированные элементы БИС // Электронная промышленность. – 1976. – № 5. – С. 50-61.
4. *Баранов Л.И.* О коэффициенте усиления полевого транзистора со смещением затвора в прямом направлении // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, № 6. – С. 1323-1325.
5. *Грицаенко П.Г.* Конструктивно-технологический вариант для СБИС на основе инжекционно-полевой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207). – С. 175-183.
6. *Баталов Б.В., Кремлев В.Я., Дьяконов В.М.* Моделирование работы полевого транзистора как элемента инжекционно-полевой логики // Микроэлектроника. – 1979. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 34-43.
7. *Дьяконов В.М., Кремлев В.Я.* Моделирование элементов инжекционно-полевых логических микросхем // Электронная промышленность. – 1979. – Вып. 4 (76). – С. 286-288.
8. Инжекционно-полевая структура для логических интегральных схем: Авт. свидетельство № 764567 (СССР). – Оpubл. в Бюлл. № 34, 1980.
9. *Кремлев В.Я.* Статические характеристики элементов СБИС инжекционно-полевой логики // В сб. «Технология, проектирование и надежность интегральных полупроводниковых схем». – М.: МИЭТ, 1988. – 122 с.
10. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Исследование структуры на взаимодополняющих биполярных транзисторах // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1988. – № 3.
11. *Гарицын А.Г., Грицаенко П.Г., Левин А.Ю., Тарасов А.О.* Полевой транзистор с самосовмещенным вертикальным каналом // Электронная техника. Серия 2 «Полупроводниковые приборы». – 1981. – Вып. 6 (148).
12. Конструктивно-технологические варианты исполнения биполярного и полевого транзисторов в одном кристалле. Инжекционно-полевая логика. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Кафедра РЭС. Реферат на тему: «Конструктивно-технологические варианты исполнения биполярного и полевого транзисторов в одном кристалле. Инжекционно-полевая логика». – Минск, 2009.

13. *Грицаенко П.Г., Кремлев В.Я., Гадков С.М.* Исследование статических параметров ИПП-инвертора. Деп. в межведомств. рефер. сб. «Техника, технология и экономика». – Серия ЭР. – Таганрог, 1981. – № 27. – 5 с.
14. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Достижение пиковаттной мощности в инжекционно-полевой логике // Известия вузов. Радиоэлектроника. –1981. – Т. XXIV, № 8. – С. 96-97.
15. *Маковийчук М.И., Паришин Е.О., Рекинский В.А.* Физические основы технологии КНИ-структур, формируемых методом ионно-лучевого синтеза // Известия вузов. Электроника. – 1998. – № 5. – С. 10-16.
16. *Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгилис Д.* Технология СБИС: В 2-х кн. / под ред. С. Зи: пер. с англ. – М.: Мир: Редакция литературы по новой технике, 1986.
17. *Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Мочалов Б.В.* Низкотемпературный отжиг SIMOX-структур в неоднородном температурном поле // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, №5. – С. 367-373.
18. *Кривилевич С.А., Маковийчук М.И., Паришин Е.О.* Ионный синтез структур кремний-на-изоляторе. Современное состояние, новые подходы и перспективы // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 363-369.
19. *Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных схем / под общ. ред. чл.-корр. РАН проф. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 400 с.
20. *Светличный А.М., Наумченко А.С., Светличная Л.А., Житяев И.Л.* Методы изоляции элементов микро- и наноструктур: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 56 с.

REFERENCES

1. *Avaev N.A., Dulin V.N., Naumov Yu.E.* Bol'shie integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Large injection-powered integrated circuits]. Moscow: Sov.radio, 1977, 248 p.
2. *Barinov V.V., Kremlev V.Ya., Moshkin V.I., Orlikovskiy A.A.* Integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Integrated circuits with injection power supply], *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika* [Foreign electronic equipment], 1973, No. 19, pp. 3.
3. *Kremlev V.Ya., Moshkin V.I.* Funktsional'no-integrirrovannyye elementy BIS [Functionally integrated elements of LSI], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry], 1976, No. 5, pp. 50-61.
4. *Baranov L.I.* O koeffitsiente usileniya polevogo tranzistora so smeshcheniem zatvora v pryamom napravlenii [On the gain factor of the field transistor with forward shift of the gate], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1975, Vol. 20, No. 6, pp. 1323-1325.
5. *Gritsaenko P.G.* Konstruktivno-tekhnologicheskyy variant dlya SBIS na osnove inzhektionsionno-polevoy logiki [Constructive and technological variant for VLSI based on injection-field logic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207), pp. 175-183.
6. *Batalov B.V., Kremlev V.Ya., D'yakonov V.M.* Modelirovanie raboty polevogo tranzistora kak elementa inzhektionsionno-polevoy logiki [Simulation of field transistor operation as an element of injection-field logic], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1979, Vol. 8, Issue 1, pp. 34-43.
7. *D'yakonov V.M., Kremlev V.Ya.* Modelirovanie elementov inzhektionsionno-polevykh logicheskikh mikroskhem [Modeling of Elements of Injection Field Logic Chips], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Industry], 1979, Issue 4 (76), pp. 286-288.
8. *Inzhektionsionno-polevaya struktura dlya logicheskikh integral'nykh skhem: Avt. svidetel'stvo № 764567 (SSSR)* [Injection field structure for logic integrated circuits: Author 's certificate No. 764567 (USSR)]. Published in Bulletin No. 34, 1980).
9. *Kremlev V.Ya.* Sticheskie kharakteristiki elementov SBIS inzhektionsionno-polevoy logiki [Static characteristics of VLSI elements of injection-field logic], *V sb. «Tekhnologiya, proektirovanie i nadezhnost' integral'nykh poluprovodnikovyykh skhem»* [In coll. "Technology, design and reliability of integrated semiconductor circuits"]. Moscow: MIET, 1988, 122 p.
10. *Kremlev V.Ya., Gritsaenko P.G.* Issledovanie struktury na vzaimodopolnyayushchikh bipolyarnykh tranzistorakh [Study of the structure of complementary bipolar transistors], *Izvestiya VUZov. Radioelektronika* [Proceedings of the Universities. Radioelectronics], 1988, No. 3.

11. *Garitsyn A.G., Gritsaenko P.G., Levin A.Yu., Tarasov A.O.* Polevoy tranzistor s samosovmeshchennym vertikal'nym kanalom [Field-effect transistor with self-displaced vertical channel], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2 «Poluprovodnikovye pribory»* [Electron Technics. Series 2 "Semiconductor devices"], 1981, Issue 6 (148).
12. Konstruktivno-tehnologicheskie varianty ispolneniya bipolyarnogo i polevogo tranzistorov v odnom kristalle. Inzheksionno-polevaya logika. Belorusskiy gosudarstvennyy universitet informatiki i radioelektroniki. Kafedra RES. Referat na temu: «Konstruktivno-tehnologicheskie varianty ispolneniya bipolyarnogo i polevogo tranzistorov v odnom kristalle. Inzheksionno-polevaya logika» [Design and technological variants of bipolar and field-effect transistors in one crystal. Injection-field logic. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Department of RES. Abstract on the topic: «Design and technological variants of bipolar and field-effect transistors in one crystal. Injection-field logic»]. Minsk, 2009.
13. *Gritsaenko P.G., Kremlev V.Ya., Gadkov S.M.* Issledovanie staticheskikh parametrov IPL-invertora [Study of static parameters of IPL inverter]. Dep. v mezhdovedstv. refer. sb. «Tekhnika, tekhnologiya i ekonomika». Seriya ER [Deposited in the interagency abstract collection Technique, «Technology and Economics». Series ER]. Taganrog, 1981, No. 27, 5 p.
14. *Kremlev V.Ya., Gritsaenko P.G.* Dostizhenie pikovattnoy moshchnosti v inzheksionno-polevoy logike [Achievement of peak power in injection-field logic], *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [News of Higher Educational USSR. Radioelectronics], 1981, Vol. XXIV, No. 8, pp. 96-97.
15. *Makoviychuk M.I., Parshin E.O., Rekshinskiy V.A.* Fizicheskie osnovy tekhnologii KNI-struktur, formiruemykh metodom ionno-lucheвого sinteza [The physical basis of the technology of COI structures formed by the method of ion-beam synthesis], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [News of Higher Educational USSR. Electronics], 1998, No. 5, pp. 10-16.
16. *Pirs K., Adams A., Kats L., Tsay Dz., Seydel T., Makgillis D.* Tekhnologiya SBIS [Tekhnologiya SBIS]: In 2-nd book, ed. by S. Zi: transl. from engl. Moscow: Mir: Redaktsiya literatury po novoy tekhnike, 1986.
17. *Rudakov V.I., Denisenko Yu.I., Mochalov B.V.* Nizkotemperaturnyy otzhig SIMOX-struktur v neodnorodnom temperaturnom pole [Low-temperature annealing of SIMOX structures in an inhomogeneous temperature field], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2000, Vol. 29, No. 5, pp. 367-373.
18. *Krivilevich S.A., Makoviychuk M.I., Parshin E.O.* Ionnyy sintez struktur kremniy-na-izolyatore. Sovremennoe sostoyanie, novye podkhody i perspektivy [Ion synthesis of silicon-on-insulator structures. Current state, new approaches and prospects], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1999, Vol. 28, No. 5, pp. 363-369.
19. *Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Reveleva M.A.* Tekhnologiya, konstruksii i metody modelirovaniya kremnievykh integral'nykh skhem [Technology, designs and methods of modeling silicon integrated circuits], under the general ed. chl.-corr. RAS prof. Yu.A. Chaplygina. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2015, 400 p.
20. *Svetlichnyy A.M., Naumchenko A.S., Svetlichnaya L.A., Zhityaev I.L.* Metody izolyatsii elementov mikro- i nanostruktur: ucheb. posobie [Methods of isolation of elements of micro- and nanostructures: textbook]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 56 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., член-корреспондент РАЕ А.В. Ковалев.

Грицаенко Павел Григорьевич – Южный федеральный университет; e-mail: dsp@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634393075; к.т.н.; с.н.с.; гл. специалист научно конструкторского бюро цифровой обработки сигналов.

Светличная Людмила Александровна – Политехнический институт (филиал ДГТУ в г. Таганроге); e-mail: <http://tpi.donstu.ru>; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623538; к.т.н.; н.с.

Gritzaenko Pavel Gregory – Southern Federal University; e-mail: dsp@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634393075; cand. of eng. sc.; senior researcher; chief specialist of the scientific design bureau of digital signal processing.

Svetlichnaya Lyudmila Aleksandrovna – Polytechnic Institute (branch of DG TU in Taganrog); e-mail: <http://tpi.donstu.ru>; Taganrog, Russia; phone: 88634623538; cand. of eng. sc.; researcher.

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО КАЛИБРАТОРА

Объектом исследования является калибратор, состоящий из кварцевого генератора и генератора гармоник на диоде с накоплением заряда. Целью исследования является выявление технических параметров и характеристик калибратора, отсутствующих в литературе. Проведено экспериментальное исследование кварцевого калибратора с сеткой частот через 50 МГц. Представлены следующие результаты: – выбег частоты за 20 минут после включения; – зависимость частоты первой гармоники от напряжения питания; – спектр гармоник в полосе частот от 0 до 1500 МГц. Даны принципиальная схема и краткое описание конструкции. Приведено фото и методика эксперимента. Калибратор рекомендуется использовать в приёмниках и анализаторах спектра для проверки их работоспособности и повышения точности настройки. Достигнуты следующие электрические параметры: – точность установки частоты первой гармоники $\pm 2,5$ кГц; – мощность первой гармоники 0 дБм; – неравномерность гармоник в полосе от 0 до 1500 МГц не более 36 дБ; – выбег частоты первой гармоники за 20 минут 34 Гц; – уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В не более 288 Гц; – ширина спектральной линии на уровне минус 40 дБ от максимума не более 4 Гц. Сравнение полученных результатов с известными показывает достаточно большую неравномерность мощности гармоник в диапазоне частот до 1500 МГц. Уменьшение неравномерности мощности гармоник можно достичь несколькими путями: – дополнить калибратор корректором амплитудно-частотной характеристики; – увеличить частоту первой гармоники. Преимуществами данного калибратора являются простота схемы и конструкции, возможность повторения в условиях серийного производства, доступность элементной базы, простота настройки, малые масса и габариты. Используя более мощные транзисторы, можно перекрыть не только дециметровый, но и сантиметровый диапазон длин волн.

Калибратор; генератор гармоник; диод с накоплением заряда; спектр гармоник; неравномерность выходной мощности; схема; конструкция; эксперимент.

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

EXPERIMENTAL STUDY OF QUARTZ CALIBRATOR

The object of research is a calibrator consisting of a quartz oscillator and a diode-based harmonic generator with charge accumulation. The aim of the study is to identify technical parameters and characteristics of the calibrator that are absent in the literature. An experimental study of a quartz calibrator with a frequency grid at 50 MHz has been carried out. The following results are presented: – overrun frequency 20 minutes after switching on; – dependence of the frequency of the first harmonic on the supply voltage; – spectrum of harmonics in the frequency range from 0 to 1500 MHz. A schematic diagram and a brief description of the design are given. A photo and experimental technique are presented. The calibrator is recommended for use in receivers and spectrum analyzers to test their performance and improve tuning accuracy. The following electrical parameters have been achieved: – frequency setting accuracy of the first harmonic ± 2.5 kHz; – power of the first harmonic 0 dBm; – non-uniformity of harmonics in the band from 0 to 1500 MHz no more than 36 dB; – run-out of the frequency of the first harmonic in 20 minutes 34 Hz; – frequency drift of the first harmonic when the supply voltage changes from 5 to 13.5 V, no more than 288 Hz; – the width of the spectral line at the level of minus 40 dB from the maximum is not more than 4 Hz. Comparison of the obtained results with the known ones shows a rather large unevenness of the harmonic power in the frequency range up to 1500 MHz. Reducing the uneven power of harmonics can be achieved in several ways: – supplement the calibrator with a corrector of the amplitude-frequency characteristic; – increase the frequency of the first har-

monic. The advantages of this calibrator are the simplicity of the circuit and design, the possibility of repetition in the conditions of serial production, the availability of the element base, ease of adjustment, small weight and dimensions. Using more powerful transistors, it is possible to cover not only the decimeter, but also the centimeter wavelength range.

Calibrator; harmonic generator; diode with charge accumulation; spectrum of harmonics; uneven output power; circuit; design; experiment.

Введение. В ряде радиоприёмных устройств и анализаторов спектра для обеспечения высокой точности установки частоты настройки используется встроенный кварцевый калибратор. К таким приборам относится анализатор спектра типа С4-60 [1].

Калибратор представляет собой кварцевый генератор и генератор гармоник.

Генераторы гармоник и умножители частоты нашли широкое применение в измерительной и приемо-передающих технике. Их описанию и исследованию посвящено значительное число работ, в том числе монографии [2–13], учебное пособие [14], статьи [15–18], диссертации [19].

В монографиях [2–13] показано, что варакторы и диоды с накоплением заряда используют преимущественно в выходных каскадах генераторов гармоник и умножителей частоты, а предварительные усилители и задающие генераторы строят на транзисторах и микросхемах. В учебном пособии [14] рассмотрена схемотехника кварцевых генераторов, дана методика их расчёта.

Объектом исследования является калибратор из состава прибора С4-60. Целью исследования является измерение параметров калибратора, не описанных в техническом описании [1].

Основные параметры калибратора следующие:

- ◆ диапазон рабочих частот 50–1500 МГц;
- ◆ первая гармоника 50 МГц;
- ◆ отклонения первой гармоники от 50 МГц не более ± 10 кГц;
- ◆ напряжение питания + 12,6 В;
- ◆ сопротивление нагрузки 50 Ом.

Схема и конструкция. Калибратор состоит из кварцевого генератора 50 МГц, эмиттерного повторителя, усилителя и генератора гармоник, что представлено на рис. 1. Кварцевый генератор работает по схеме автогенератора с кварцем в цепи обратной связи. Подстройка частоты генератора производится сердечником катушки индуктивности L1. Сигнал с кварцевого генератора через эмиттерный повторитель и усилитель поступает на генератор гармоник. Генератор гармоник состоит из диода с накоплением заряда и цепочек смещения. Из синусоидального напряжения диодом формируется последовательность импульсов малой длительности, спектр которых содержит большое число медленно убывающих по амплитуде гармоник, частота которых кратна 50 МГц. Частота основной гармоники кварцевого калибратора отличается от 50 МГц не более чем на ± 10 кГц.

Почти все детали калибратора размещены на печатной плате из стеклотекстолита размером 80x58x1,5 мм. Плата закреплена четырьмя стойками в корпусе чашечного типа и закрыта крышкой. Фото калибратора со снятой крышкой можно видеть на рис. 2.

В калибраторе применены следующие детали:

- ◆ транзистор Т1, Т2 – типа 2Т306В;
- ◆ транзисторы Т3, Т4 – типа 2Т371А;
- ◆ постоянные резисторы типа ОМЛТ – 0,125;
- ◆ конденсаторы типа КД и КМ-56;
- ◆ катушка индуктивности L1 типа К0-III-0,12 мкГн;

- ◆ катушка индуктивности L2 бескаркасная 4 витка посеребрённым проводом 1 мм (на оправке 8 мм);
- ◆ резонатор типа РГ-05-14БР-50 МГц-МЗ-У;
- ◆ умножительный диод 2А609Б [20].

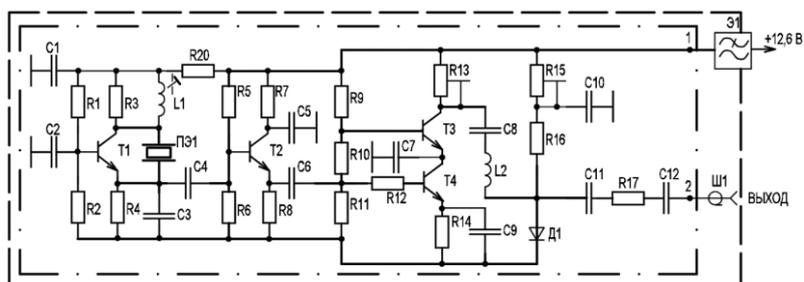


Рис. 1. Принципиальная схема калибратора



Рис. 2. Фото калибратора со снятой крышкой

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3: В этом эксперименте получен спектр выходного сигнала в полосе от 0 до 1500 МГц (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что неравномерность гармоник составляет 36 дБ. При этом первая гармоника имеет мощность 0 дБм, третья гармоника имеет мощность минус 34 дБм.

Во втором эксперименте проводилось измерение выбега частоты за 20 минут после включения. Результаты измерений с интервалом 2 минуты заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построен график на рисунке 5, из которого видно, что максимальный выбег частоты составил 34 Гц. Измерения проведены при параметрах анализатора спектра SPAN = 1 кГц и BW = 4.7 Гц.

В третьем эксперименте снималась зависимость частоты первой гармоники от напряжения питания. Напряжение питания изменялось в пределах от 5 до 13,5 В с шагом 0,5 В. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построен график на рис. 6, из которого видно, что уход частоты составил около 0,288 кГц.



Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

Таблица 1

Выбег частоты при $U_{пит}=12,6$ В

t, мин	f, МГц	t, мин	f, МГц
0	50.002399	12	50.002360
2	50.002384	14	50.002359
4	50.002373	16	50.002358
6	50.002367	18	50.002357
8	50.002364	20	50.002356
10	50.002361		

Таблица 2

Зависимость частоты от напряжения питания

U _{пит} , В	f, МГц	U _{пит} , В	f, МГц
5.0	49.99992	9.5	50.00116
5.5	50.00000	10.0	50.0014
6.0	50.00008	10.5	50.0016
6.5	50.00024	11.0	50.0018
7.0	50.00038	11.5	50.0020
7.5	50.00054	12.0	50.0022
8.0	50.00070	12.5	50.0024
8.5	50.00084	13.0	50.0026
9.0	50.00100	13.5	50.0028

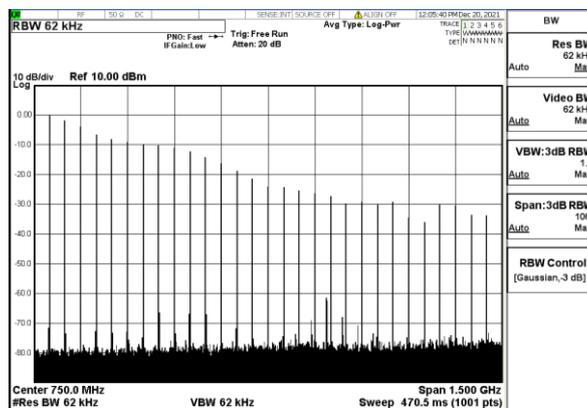


Рис. 4. Спектр на выходе калибратора в полосе 1500 МГц

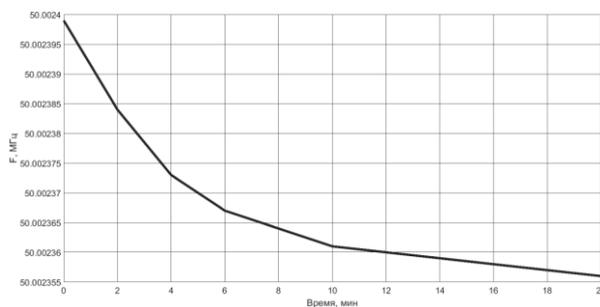


Рис. 5. Выбег частоты за 20 минут

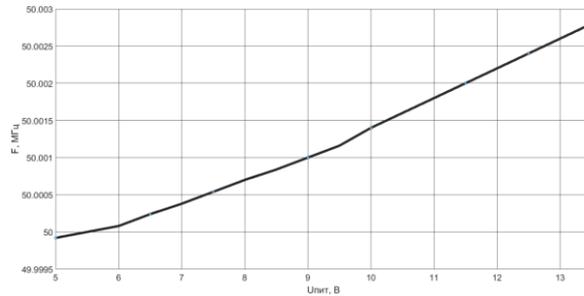


Рис. 6. Зависимость частоты от напряжения питания

В табл. 3 для сравнения приводятся заданные и измеренные параметры калибратора.

Таблица 3

Основные параметры калибратора

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Номинальное значение частоты задающего генератора, МГц	50	50
Точность установки частоты задающего генератора, кГц	± 10	± 2,5
Мощность первой гармоники выходного сигнала, дБм (мВт)	0 (1)	0 (1)
Неравномерность гармоник в полосе рабочих частот от 50 до 1500 МГц, дБ	–	36
Напряжение питания, В	12,6	12,6
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	50	50
Выбег частоты первой гармоники за 20 минут после включения, кГц	–	0,034
Уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В, кГц	–	0,288
Ширина спектральной линии не более, Гц, на уровне минус 40 дБ от максимума	–	4

Заключение. В результате проведенного экспериментального исследования выявлены параметры калибратора, отсутствующие в техническом описании на прибор С4-60, а именно:

- ◆ неравномерность гармоник в полосе от 50 до 1500 МГц не более 36 дБ;
- ◆ выбег частоты первой гармоники за 20 минут после включения 0,034 кГц;
- ◆ уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В не более 0,288 кГц;
- ◆ ширина спектральной линии первой гармоники на уровне минус 40 дБ от максимума 4 Гц.

Преимуществами исследованного калибратора являются: малые габариты и масса, доступность технологии изготовления (печатная плата на фольгированном стеклотекстолите) и элементной базы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Е Э1.406.056ТО. Ч. 2. 1991 г. – 288 с.
2. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 320 с.

3. *Касаткин Л.В., Чайка В.Е.* Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
4. *Ризкин И.Х.* Умножители и делители частоты. – М.: Сов. радио, 1976. – 328 с.
5. *Бруевич А.Н., Евтянов С.И.* Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. – М.: Сов. радио, 1965. – 344 с.
6. *Грибов Э.Б.* Нелинейные явления в приёмно-передающем тракте аппаратуры связи на транзисторах. – М.: Связь, 1971. – 243 с.
7. *Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л.* Основы теории и техники умножения частоты. – М.: Сов. радио, 1964. – 327 с.
8. *Кищинский А.А. и др.* Умножители частоты на полевых транзисторах с барьером Шотки. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – Вып. 10 (1558). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1990. – 32 с.
9. *Соловьёв В.С.* Умножители частоты СВЧ диапазона на транзисторах. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – Вып. 17 (1220). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1986. – 27 с.
10. Измерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
11. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчёт / под ред. Р.А. Валитова и И.А. Попова. – М.: Сов. радио, 1973. – 464 с.
12. *Дингес С.И., Кочемасов В.Н.* Устройства преобразования частоты / под ред. В.Н. Кочемасова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2020. – 432 с.
13. *Бруевич А.Н.* Умножители частоты. – М.: Сов. радио, 1970. – 247 с.
14. *Зикий А.Н., Помазанов А.В.* Устройства телекоммуникационных систем. Кварцевые генераторы: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 129 с.
15. *Rumyantsev K.Y., Zikiy A.N., Zlamani P.N., Mamchenko S.O.* Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Volt .7, No. 3.13 Special ISSUE 13. – P. 41-43.
16. *Зикий А.Н., Зламан П.Н.* Варакторный умножитель частоты 400 МГц // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 68-74.
17. *Андреанов А.В., Зикий А.Н., Ронис В.Н.* Умножитель частоты высокой кратности // Сб. статей II МНПК от 20 февраля 2020 года в г. Петрозаводске. МЦНП «Новая наука», 2020. – С. 112-118.
18. *Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В., Шипулин М.В.* Умножители частоты миллиметрового диапазона // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2011. – № 17.
19. *Березин В.В.* Моделирование и проектирование широкополосных диодных умножителей частоты КВЧ-диапазона: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Н. Новгород: ННГУ, 2018. – 20 с.
20. Полупроводниковые приборы. СВЧ диоды. Справочник / под ред. Б.А. Наливайко. – Томск, МГП «Раско», 1992. – 224 с.

REFERENCES

1. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. E E1.406.056TO [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. E E1.406.056TO]. Part 2. 1991, 288 p.
2. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: Izdat. dom MEI, 2010, 320 p.
3. *Kasatkin L.V., Chayka V.E.* Poluprovodnikovye ustroystva diapazona millimetrovyykh voln [Semiconductor devices of the millimeter wave range]. Sevastopol': Veber, 2006, 319 p.
4. *Rizkin I.Kh.* Umnozhiteli i deliteli chastoty [Multipliers and frequency dividers]. Moscow: Sov. radio, 1976, 328 p.
5. *Bruevich A.N., Evtyanov S.I.* Approksimatsiya nelineynykh kharakteristik i spektry pri garmonicheskom vozdeystvii [Approximation of nonlinear characteristics and spectra under harmonic influence]. Moscow: Sov. radio, 1965, 344 p.
6. *Gribov E.B.* Nelineynye yavleniya v priemo-peredayushchem trakte apparatury svyazi na tranzistorakh [Nonlinear phenomena in the receiving and transmitting path of communication equipment on transistors]. Moscow: Svyaz', 1971, 243 p.
7. *Zhabotinskiy M.E., Sverdlov Yu.L.* Osnovy teorii i tekhniki umnozheniya chastoty [fundamentals of the theory and technique of frequency multiplication]. Moscow: Sov. radio, 1964, 327 p.

8. *Kishchinskiy A.A. i dr.* Umnozhiteli chastoty na polevykh tranzistorakh s bar'erom SHotki. Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh [Frequency multipliers on field-effect transistors with a Schottky barrier. Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics], Issue 10 (1558). Moscow: TSNI "Elektronika", 1990, 32 p.
9. *Solov'ev V.S.* Umnozhiteli chastoty SVCh diapazona na tranzistorakh. Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh [Frequency multipliers of the microwave range on transistors. Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics], Issue 17 (1220). Moscow: TsNII "Elektronika", 1986, 27 p.
10. Izmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and HF measuring equipment. Node and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
11. Radiopere dayushchie ustroystva na poluprovodnikovyykh priborakh. Proektirovanie i raschet [Radio transmitting devices on semiconductor devices. Design and calculation], ed. by R.A. Valitova i I.A. Popova. Moscow: Sov. radio, 1973, 464 p.
12. *Dinges S.I., Kochemasov V.N.* Ustroystva preobrazovaniya chastoty [Frequency conversion devices], ed. by V.N. Kochemasova. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2020, 432 p.
13. *Bruevich A.N.* Umnozhiteli chastoty [Frequency multipliers]. Moscow: Sov. radio, 1970, 247 p.
14. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Ustroystva telekommunikatsionnykh sistem. Kvartsevye generatory: ucheb. posobie [Devices of telecommunication systems. Quartz oscillators: quartz oscillators]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2018, 129 p.
15. *Rumyantsev K.Y., Zikiy A.N., Zlaman P.N., Mamchenko S.O.* Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode, *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, Volt .7, No. 3.13 Special ISSUE 13, pp. 41-43.
16. *Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Varaktornyy umnozhitel' chastoty 400 MGts [Varactor frequency multiplier 400 MHz], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and Information Complexes and Systems], 2018, Vol. 14, No. 1, pp. 68-74.
17. *Andrianov A.V., Zikiy A.N., Ronis V.N.* Umnozhitel' chastoty vysokoy kratnosti [Frequency multiplier of high multiplicity], *Sb. statey II MNPK ot 20 fevralya 2020 goda v g. Petrozavodsk* [Collection of articles of the II MNPC dated February 20, 2020 in Petrozavodsk]. MTSNP «Novaya nauka», 2020, pp. 112-118.
18. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V., Shipulin M.V.* Umnozhiteli chastoty millimetrovogo diapazona [Frequency multipliers of the millimeter range], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Informational counteraction to the threats of terrorism], 2011, No. 17.
19. *Berezin V.V.* Modelirovanie i proektirovanie shirokopolosnykh diodnykh umnozhitel'ey chastoty KVCh-diapazona: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Modeling and design of broadband diode multipliers of the HF frequency range: abstract of the cand. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod: NNGU, 2018, 20 p.
20. Poluprovodnikovyye pribory. SVCh diody. Spravochnik [Semiconductor devices. Microwave diodes. Guide], ed. by B.A. Nalivayko. Tomsk, MGP «Rasko», 1992, 224 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: +79896270939, Master, design engineer of the 2nd category.

С.В. Жилин, В.В. Архипенко, Е.С. Басан, М.Ю. Поленов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ В РАЗЛИЧНЫХ
ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯХ***

Общая проблема традиционных радиоканалов связи – нехватка свободных частот, шумление, низкая пропускная способность, необходимость получения лицензии на использование частоты, относительная простота взлома. Беспроводные оптические каналы связи преодолевают данные ограничения, является одним из видов систем связи, использующих открытое пространство для передачи информации, переносимой светом – это указывает на необходимость прямой видимости приёмопередатчиков. Из-за влияния различных погодных условий световой поток подвержен атмосферному затуханию. В данной работе было проведено исследование метода повышения эффективности высокопроизводительных беспроводных оптических каналов связи в различных погодных условиях: ясное небо, туман, дождь и снег. Была рассмотрена существующая технология беспроводной оптической связи – система с применением плотного мультиплексирования (DWDM) и одним входом и одним выходом (SISO). И было предложено улучшить существующую систему применением множественного ввода-вывода (MIMO). Был проведён анализ влияния и затухания на беспроводную оптическую сеть в различных погодных условиях. Исследование выполнено на основе использования инструментария программного обеспечения для моделирования Optisystem, которое используется для эмуляции различных погодных условий затухания в двух типах систем. Были разработаны модели для каждой из исследуемых систем оптической связи. Сравнение между системами SISO и MIMO проводится с точки зрения коэффициента качества при различных погодных условиях. Предложенная система показывает многообещающие результаты по производительности и качеству принимаемого сигнала. Длина пути передачи предложенной системы в условиях плотного тумана увеличивается на 33,6%. Длина пути передачи предложенной системы в условиях сильного дождя увеличивается на 63,89%. Длина пути передачи предложенной системы при сильном снеге увеличивается на 35,21%.

Оптические каналы связи; ОКС; система SISO; система MIMO; плотное мультиплексирование; DWDM; затухание сигнала; ясное небо; туман; дождь; снег.

S.V. Zhilin, V.V. Arkhipenko, E.S. Basan, M.Yu. Polenov

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE FREE SPACE
OPTICAL COMMUNICATION CHANNELS IN VARIOUS WEATHER
CONDITIONS**

A common problem of traditional radio communication channels - the lack of free frequencies, noise, low bandwidth, the need to obtain a license to use the frequency, the relative ease of hacking. Free space optical communication channels overcome these limitations, is one of the types of communication systems that use open space to transmit information carried by light - this points to the need for direct visibility of the transceivers. Due to the influence of various weather conditions, the light flux is subject to atmospheric attenuation. In this paper, a method to improve the efficiency of high-performance wireless optical communication channels in different weather conditions: clear sky, fog, rain and snow was investigated. The existing wireless optical communication technology, a dense multiplexing multiplexing (DWDM) system with one input and one output (SISO), was considered. And it was proposed to improve the existing system by applying multiple input/output (MIMO). An impact and attenuation analysis on the wireless optical network in different weather conditions

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта научно-исследовательской магистратуры Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета ГрМг/21-01-КТ.

was conducted. The study was based on the use of the Optisystem simulation software toolkit, which is used to emulate different weather conditions of attenuation in two types of systems. Models were developed for each of the optical communication systems studied. A comparison between SISO and MIMO systems is made in terms of quality factor under different weather conditions. The proposed system shows promising results in terms of performance and received signal quality. The transmission path length of the proposed system in dense fog conditions increases by 33.6%. The transmission path length of the proposed system in heavy rain increases by 63.89%. The transmission path length of the proposed system in heavy snow increases by 35,21%.

Free space optics (FSO); SISO system; MIMO system; dense wavelength division multiplexing (DWDM); signal attenuation; clear sky; fog; rain; snow.

Введение. Системы на основе оптического канала связи (ОКС/FSO) стали технической революцией в беспроводной связи. В последнее время этот тип коммуникационных систем считается подходящим средством для высокоскоростной передачи сигнала, поскольку он зависит от светового излучения при передаче сигнала. Системы ОКС имеют ряд преимуществ перед радиочастотными (РЧ) системами связи из-за высокой пропускной способности ОКС, которая является важной характеристикой для мобильной связи, в том числе и для радиочастотной связи. ОКС лишена необходимости получения лицензии на использование спектральной частоты. Кроме того, радиочастотная система менее безопасна по сравнению с системой связи ОКС.

ОКС работают в ближнем инфракрасном диапазоне (ИК), что указывает на технологию прямой видимости. ОКС может дать потенциальное решение проблемы «последней мили», поскольку ОКС имеет преимущество в виде высокой скорости передачи данных и гибкости. В ОКС отправляется модифицированный луч инфракрасного или видимого света через атмосферу [1]. Так же существует альтернатива ИК диапазону – ультрафиолетовый (УФ) диапазон. Но в УФ диапазоне волны почти полностью поглощаются атмосферой [2]. В УФ диапазоне в отличие от ИК диапазона существуют физические факторы, существенно влияющие на построение и функционирование систем связи [3].

Концепция ОКС была изучена давно, но не была реализована на практике из-за ограничений электронных устройств, которые были разработаны в ту эпоху [4]. ОКС сталкивается с проблемой затухания из-за препятствий, создаваемых объектами, и погодных условий. Атмосфера и погодные условия, такие как туман, дождь и снег, являются основными причинами вызывающие поглощение и рассеивание сигнала. Кроме того, препятствия в виде птиц или насекомых вызывают прерывание передаваемого оптического сигнала [5, 6].

В работе [7] предлагается использовать несколько лучей передачи между станциями передатчика и приемника, т.е. метод множественного ввода-вывода (MIMO) для снижения затухания. Так же предлагается комбинирование лазерных лучей для многолучевой системы ОКС, которая смягчает проблемы, возникающие из-за погодных затуханий (поглощение, рассеяние) и потерь, которые происходят в принимаемой стороне из-за потерь, в детекторе [8].

В данном исследовании предлагается гибридная ОКС с применением плотного мультиплексирования (DWDM) MIMO, которая может преодолеть проблемы атмосферной турбулентности с масштабируемостью и высокой скоростью передачи данных. Также в исследовании сравниваются традиционная система DWDM с одиночным вводом-выводом (SISO) и предложенная система DWDM-MIMO и показано, что предложенная система демонстрирует значительное улучшение коэффициента качества принимаемого сигнала. Предложенная система является лучшим кандидатом для быстрого увеличения пропускной способности без необходимости использования новых передатчиков и приемников FSO и решения проблемы "последней мили".

Технология SISO. Развитие беспроводной связи положило начало новым высокопроизводительным способам передачи данных. Первый, классический и самый простой вариант – использования одной передающей и одной приемной антенны изображен на рис. 1. Такая система с точки зрения терминологии называется SISO – Single Input Single Output. Реализация данной технологии была разработана и смоделирована для сравнения характеристик.

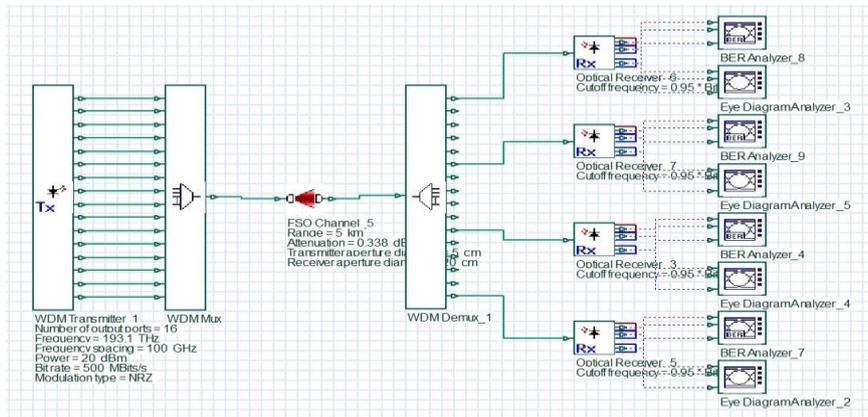


Рис. 1. DWDM-SISO

Система FSO, использующая передачу сигнала по технологии SISO, более чувствительна к атмосферному затуханию из-за влияния погодных факторов и прерывания из-за препятствий, таких как птицы и насекомые.

Мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM). WDM используется для повышения производительности системы связи ОКС путем увеличения масштабируемости и пропускной способности системы связи. WDM получила свою известность в области систем связи на основе оптического волокна. Известны два типа WDM: (CWDM) грубое и (DWDM) плотное – классифицируются в зависимости от расстояния между каналами. Кроме того, WDM - это технология, в которой более одного оптического сигнала передается через одну среду с использованием различных длин волн. WDM является копией мультиплексирования с частотным разделением (FDM), но основное различие между этими двумя методами заключается в использовании длин волн или диапазона частот в каждом методе [4].

Демультимплексоры, находящиеся на принимающей стороне системы связи WDM, восстанавливают данные. WDM позволяют работать в одной системе независимым битрейтам информации и протоколам доступа [5, 9], что является основным условием для усовершенствования системы связи.

Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь. Самой большой проблемой для реализации оптической беспроводной связи является погодное затухание, которое происходит из-за рассеивания и поглощения. Частицы воды и диоксида углерода являются основными причинами поглощения сигналов. С другой стороны, дождь, туман, облака и снег являются основными причинами рассеивания беспроводных оптических сигналов. Рассеивание заставляет часть луча отклоняться от заданного вектора. Выражение затухания из-за погодных условий представлено в формуле (1).

$$A_{atm} = \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

где A_{atm} , обозначают общее затухание, α , обозначают общий коэффициент затухания, L , обозначают длину пути передачи.

Общий коэффициент затухания вычисляется согласно формуле (2).

$$\alpha = \beta\alpha + \beta s, \quad (2)$$

где $\beta\alpha$, обозначает коэффициент затухания поглощения, βs , обозначает коэффициент затухания рассеяния.

В FSO длины волн используются такие, чтобы сделать изменение энергетических состояний невозможно и поглощение считается нулевым [10]. Общее затухание коэффициент становится как в формуле (3):

$$\alpha = \beta s. \quad (3)$$

Затухание в тумане. Туман – это облако, состоящее из мелких частиц воды, дыма, льда или всего вместе, которое образуется у поверхности земли. Туман является основной причиной рассеивания света, что ухудшает видимость [11]. Ограничение традиционного способа вычисления затухания в тумане зависит от радиуса размера частиц. В большинстве случаев размер частиц неизвестен, что затрудняет вычисление затухания [5], как в уравнении (4):

$$\beta_s = \sum_i^{n_{max}} (n_i * Q_i \pi r_i^2), \quad (4)$$

где β_s , обозначает затухание рассеяния, n_i , обозначает распределение частиц, Q_i , обозначает эффективность рассеяния, r_i , обозначает радиус размера частиц.

Чтобы преодолеть ограничение традиционного подхода, вводится закон, согласно которому величина затухания зависит только от дальности видимости, а не от размера частиц. Атмосферная видимость может быть определена, как расстояние до тела, когда диспропорция изображения составляет (5%) от исходного изображения, если оно находится вблизи [12]. Дальность видимости рассчитывается при длине волны 550 нм, которая соответствует наибольшей интенсивности солнечного спектра. Затухание в зависимости от диапазона видимости было рассчитано в соответствии с уравнением (5) [5, 13]:

$$A FOG = \frac{10 \log(v\%) }{v \text{ km}} \left(\frac{\lambda}{\lambda^0}\right)^{-q} = \frac{13}{v} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}, \quad (5)$$

где $A FOG$, обозначает затухание в тумане в (дБ/км), v , обозначает дальность видимости в км, q , обозначает коэффициент распределения частиц по размерам в зависимости от дальности видимости, λ , обозначает длину волны передаваемого сигнала в нм, $\lambda^0 = 550$ нм обозначает эталон видимости длины волны, соответствующей максимальной интенсивности солнечного спектра.

q , рассчитывается в уравнении (6):

$$q = f(x) = \begin{cases} 1.6 & v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585 v^{1/3} & v < 6 \text{ km} \end{cases}. \quad (6)$$

Затухание в дожде. Рассеивание в дожде отличается от чистой атмосферы, радиус капель дождя, образующихся в результате выпадения осадков, находится в диапазоне (100–1000 мкм), что значительно больше длины волны стандартных систем FSO. В результате лазер может пройти сквозь частицы дождевых капель с минимальным эффектом рассеяния [14]. Модель, которая используется для расчета затухания дождя, зависит от скорости дождя, количества дождевых капель и их размера. Затухание линейно возрастает при увеличении скорости дождя. Среднее значение скорости дождя увеличивается при увеличении размеров капель дождя [15]. Затухание, вызванное дождем, приведено в уравнении (7) [16].

$$A \text{ rain} = 1.07 R^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

где $A \text{ rain}$, обозначает затухание дождя в (дБ/км), R , обозначает скорость дождя в (мм/ч).

Затухание в снеге. Кусочки снега в основном больше, чем капли дождя, и вносят в оптический сигнал затухание, превышающее эффект от дождя. В литературе сообщается, что диаметр кусочков снега может быть более 20 мкм, что является основной причиной отказа канала связи при узком лазерном луче [13]. Энергия принимаемого сигнала зависит от диаметра кусков снега и положения кусков снега относительно поперечного сечения лазерного луча [17]. Затухание сигнала, вызванное снежными погодными условиями, зависит от скорости снегопада (в мм/ч) и длины волны сигнала [18]. Затухание моделируется на основе классификации: мокрый и сухой снег – и рассчитывается по уравнению (8).

$$A_{snow} = a S^b, \quad (8)$$

где A_{snow} , обозначает затухание снега в (дБ/км), S , обозначает скорость выпадения снега в (мм/ч), (a, b) , обозначает параметры, которые классифицируют тип снегопада: мокрый или сухой снег, и в соответствии с этими двумя типами следующие значения для параметров (a, b) для этих типов:

- ♦ для мокрого снега: $a = 1.023 (10^{-4} \lambda) + 3.7855466$, $b = 0.72$,
- ♦ для сухого снега: $a = 5.42 (10^{-5} \lambda) + 5.4958776$, $b = 1.38$.

Из вышеизложенного следует, что затухание из-за сухого снега больше, чем из-за мокрого снега, поэтому он рассматривается в данном исследовании.

Повышение эффективности ОКС в различных погодных условиях

На рис. 2 представлена разработанная система MIMO, использующая несколько передатчиков и приемников, которая состоит из трёх основных частей: передатчик, канал и приемник.

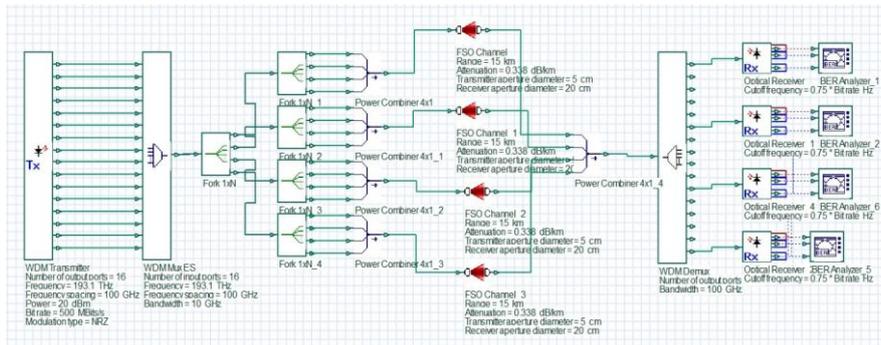


Рис. 2. MIMO

Передатчик содержит трансмиттер из 16 subsystem и мультиплексор WDM (WDM Mux), который предназначен для мультиплексирования оптических сигналов различных длин волн в один оптический канал связи. Как показано на рисунке 2, в завершении мультиплексора находится компонент, называемый разветвителем. Компонент ветвления применяется для формирования нескольких лазерных лучей из одного источника. Каждому лазерному лучу, созданному после разветвления, соответствует еще один компонент ветвления. Для увеличения мощности оптического сигнала лазерные лучи, создаваемые вторым разветвителем, комбинируются в сумматоре и передаются в канал FSO.

Мощность, используемая передатчиком, составляет 20 дБм. Частота источника света составляет 193,1 THz, а расстояние между оптическими каналами – 100 GHz. Передающая и приемная апертуры составляют 5 см и 20 см соответственно, а скорость передачи данных – 500 Мбит/с.

Канал FSO состоит из 4×4 MIMO технологии, с различным затуханием в зависимости от погодных условий. Принимающая часть состоит из:

- ◆ Сумматор мощности используется для интеграции передаваемых оптических сигналов и затем вводится в демультиплексор WDM DE, после чего начинается процесс демультиплексирования. Далее сигнал поступает на оптический приемник.

- ◆ Анализатор BER используется для вычисления коэффициента битовых ошибок принятого сигнала.

Коэффициент качества принимаемого сигнала рассчитывается при различных погодных условиях путем изменения расстояния между передающей и принимающей станциями. Коэффициент качества связан с BER, как показано в уравнении (9):

$$BER = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad (9)$$

где BER, обозначает коэффициент битовых ошибок принятого сигнала, Q, коэффициент качества принимаемого сигнала.

Модель была верифицирована с помощью симулятора Optisystem [19]. Предложенная система также сравнивается с обычной системой DWDM-SISO с учетом атмосферной турбулентности при различных погодных условиях [20, 21]. Стоит отметить, что в исследовании также рассматриваются значения ниже минимального коэффициента качества (МКК) (которые ниже 6), а значения BER выше 10^{-9} которые указывают на неэффективность оптической системы.

Производительность ОКС в условиях ясной погоды и тумана. Рассматривается влияние погодных условий ясного неба и тумана на производительность системы DWDM-SISO и системы DWDM-MIMO.

В данном исследовании использовалась математическая модель для расчета затухания на основе различных диапазонов видимости (формула 5). При ясном небе видимость составляет более 10 км, что соответствует затуханию 0,338 дБ/км. При легком тумане видимость составляет $(0,5 > v > 10)$ км, что соответствует затуханию 7,743 дБ/км. Для умеренного тумана видимость составляет $(0,05 > v > 0,5)$ км, что соответствует затуханию 26 дБ/км. Для густого тумана видимость $(v > 0,05)$ км, что соответствует затуханию 260 дБ/км.

Учитывая рассчитанные значения затухания для ясного неба и различных условий тумана, симулятор Optisystem рассчитывает коэффициенты качества на основе различных длин путей передачи. На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента качества от расстояния при использовании: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях ясного неба и тумана. Результаты моделирования:

- ◆ **Затухание в чистом небе 0,338 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 4728м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 14334м.

- ◆ **Затухание при легком тумане 7,743 дБ/км**

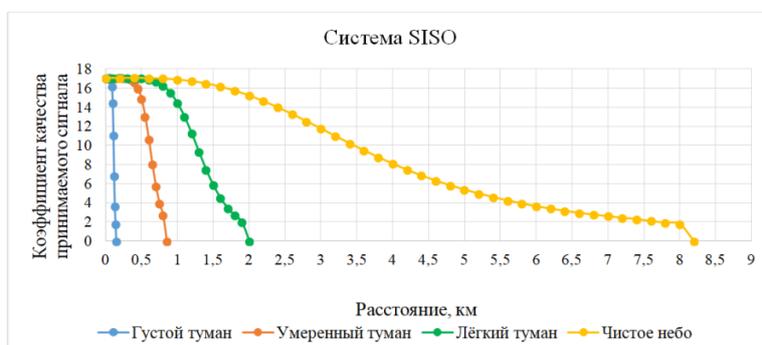
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1490м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 2553м.

- ◆ **Затухание при умеренном тумане 26 дБ/км**

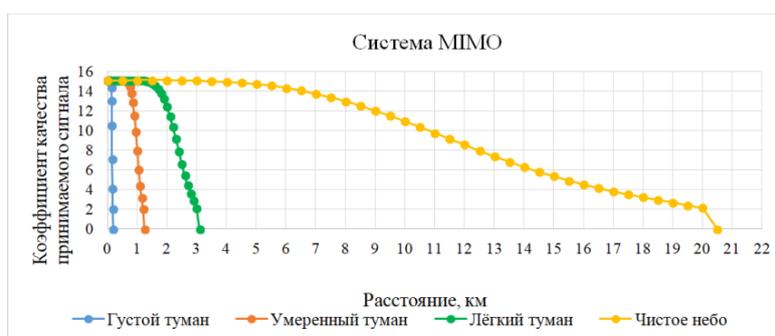
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 691м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 1051м.

- ◆ **Затухание в густом тумане 260 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 122м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 163м. Это означает, что система MIMO увеличивает на 33,60% длины пути передачи.



а



б

Рис. 3. Зависимость коэффициента качества от расстояния при использовании: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях ясного неба и тумана

Производительность ОКС в условиях дождливой погоды. Рассматривается производительность традиционной системы DWDM-SISO и предложенной системы DWDM-MIMO в трех случаях дождливой погоды (легкий, средний и сильный дождь). Затухание в этих случаях может быть измерено в соответствии с формулой 7, которые зависят от интенсивности дождя и длины волны передаваемого оптического сигнала. Средняя скорость дождя для этих случаев составляет 2,5мм/ч, 12,5мм/ч и 25мм/ч, при легком, среднем и сильном дожде, соответственно [17]. Следовательно, затухание для этих случаев составляет 1,988 дБ/км при легком дожде, 5,8444 дБ/км при среднем дожде и 9,29 дБ/км при сильном дожде.

Учитывая рассчитанные значения затухания для различных условий дождя, симулятор Optisystem позволяет рассчитать коэффициенты качества на основе различных длин путей передачи. На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициента качества от расстояния передачи при использовании: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях дождя.

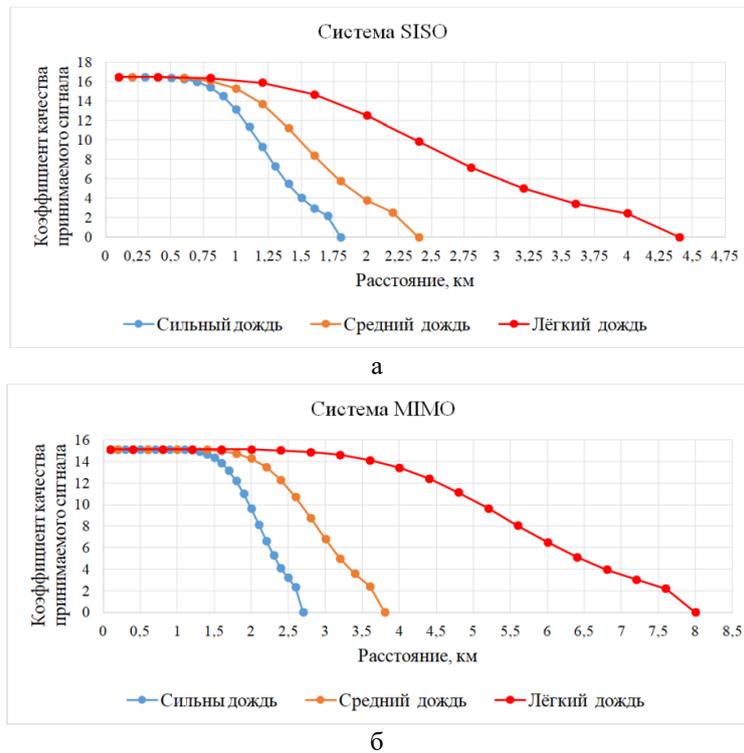


Рис. 4. Зависимость коэффициента качества от расстояния передачи при использовании: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях дождливой погоды

Результаты моделирования:

◆ **Затухание при слабом дожде 1,988 дБ/км.**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 3021м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 6140м.

◆ **Затухание при среднем дожде 5,8444 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1782м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 3086м.

◆ **Затухание при сильном дожде 9,29 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1371м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 2247м,

Это означает, что система MIMO увеличивает на 63,89% длины пути передачи.

Производительность ОКС в условиях сухой снежной погоды. Оцениваются характеристики системы DWDM-SISO и предложенной системы DWDM-MIMO в трех случаях погодных условий с сухим снегом. Затухание сухого снега рассчитывается на основе уравнения 8, которое зависит от скорости снега (S). В данном исследовании рассматриваются три типа условий сухого снега: легкий, средний и сильный, которые определяются на основе средней скорости снега. При легком

сухом снеге скорость снега составляет 2,5мм/час, при среднем сухом снеге скорость снега составляет 5мм/час, а при сильном сухом снеге скорость снега составляет 10мм/час [17].

Исходя из уравнения 8 и используя скорость снега, значения затухания для условий сухого снега составляют 19,356 дБ/км, 50,654 дБ/км, 131,835 дБ/км для легкого, среднего и сильного сухого снега соответственно.

Учитывая рассчитанные значения затухания для различных условий сухого снега, симулятор Optisystem используется для расчета коэффициента качества на основе различных длин путей передачи. На рисунке 5 представлены графики зависимости коэффициента качества от длины пути передачи с использованием: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях снежной погоды. Результаты моделирования:

◆ **Затухание при легком сухом снеге 19,356 дБ/км.**

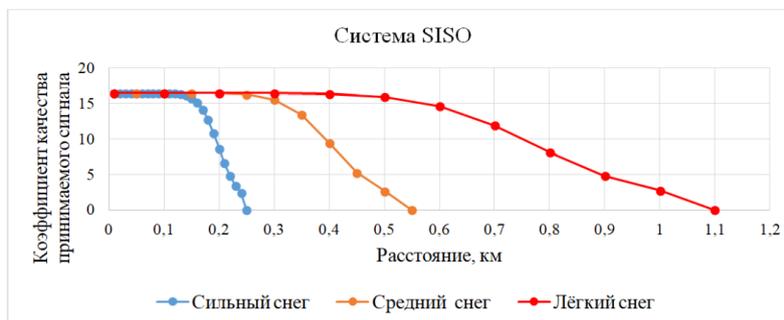
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 684м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 1316м.

◆ **Затухание при среднем сухом снеге 50,654 дБ/км**

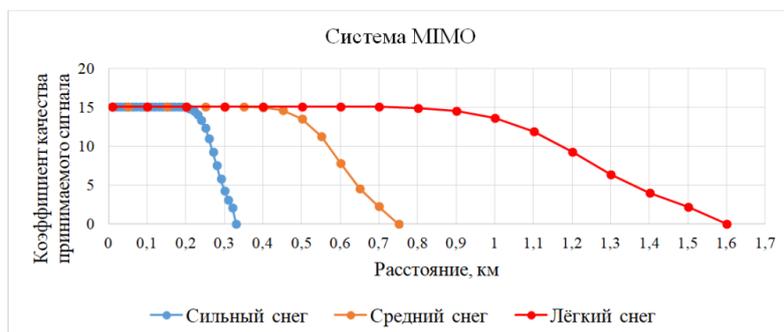
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 440м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 627м.

◆ **Затухание при сильном сухом снеге 131,835 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 213м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 288м. Это означает, что система MIMO увеличивает на 35,21% длину пути передачи.



а



б

Рис. 5. Зависимость коэффициента качества от длины пути передачи с использованием: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях снежной погоды

Полученные результаты представлена в табл. 1, которая демонстрирует значительное улучшение использования предлагаемой системы по сравнению с традиционной системой DWDM-SISO для системы оптической связи. Результаты показывают, что коэффициент качества уменьшается, когда длина пути передачи увеличивается из-за затухания. Однако, используя предложенную систему, сигнал может передаваться на большую длину с лучшим качеством при всех описанных погодных условиях. Это достигается за счет использования техники MIMO. Используемая технология MIMO создает избыточные пути передачи, которые помогают преодолеть препятствие, а DWDM увеличивает масштабируемость количества передаваемых сигналов.

Таблица 1

Сравнение системы DWDM-SISO и DWDM-MIMO при максимальной длине передачи, при различных погодных условиях

Погодные условия	SISO, м	MIMO, м	Улучшение на %
Чистое небо	4728	14334	+203,17%
Легкий туман	1490	2553	+71,34%
Умеренный туман	691	1051	+52,09%
Густой туман	122	163	+33,6%
Легкий дождь	3021	6140	+103,24%
Средний дождь	1782	3086	+73,17%
Сильный дождь	1371	2247	+63,89%
Легкий снег	864	1316	+52,31%
Средний снег	440	627	+42,5%
Сильный снег	213	288	+35,21%

Заключение. Несмотря на то, что система связи FSO имеет основные преимущества, включая высокую скорость передачи данных, безопасность и пропускную способность, она страдает от проблем, в основном из-за различных погодных факторов. В данной работе представлена реализация и моделирование традиционной системы DWDM-SISO и гибридной системы DWDM-MIMO. Каждая система тестируется в различных погодных условиях, таких как ясное небо и различные условия тумана, различные условия дождя и различные условия сухого снега. Результаты системы MIMO, показывают улучшение дальности передачи и качества сигнала по сравнению с системой SISO отражены в табл. 1. Учитывая наихудшие погодные условия, вызывающие высокое затухание, длина пути: при затухании в сильном тумане 260дБ/км увеличивается на 33,6%; при затухании в сильном дожде 9,29дБ/км увеличивается на 63,89%; при затухании в условиях сильного сухого снега 131,835дБ/км увеличивается на 35,21%. Стоит выделить преимущество предлагаемой системы. Она может применяться в местах с суровыми погодными условиями, такими как сильный туман, проливной дождь, снег и пыльные бури.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mohammad A.B.* Optimization of FSO System in Tropical Weather Using Multiple Beams // Proc. of International Conf. on IEEE Photonics (ICP). – 2014. – P. 109-112.
2. *Ефимова Ю.И., Проценко Э.В., Роменский М.В., Унру П.П.* Беспроводная оптическая связь в ультрафиолетовом С-диапазоне // Modern science. – 2021. – № 4-1. – С. 445-450.

3. Поллер Б.В., Бритвин А.В., Никитенко Н.С., Щетинин Ю.И. Атмосферные ультрафиолетовые линии связи. Методы построения и характеристики // XXV международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Новосибирск, 2019. – С. В261-В264.
4. Ahmed A., Singh A., Singh A., and Kaur S. Performance Analysis of WDM-MIMO Free Space Optical System Under Atmospheric Turbulence // Proc. of International Conf. on Signal Processing and Integrated Networks. – 2019. – P. 820-825.
5. Mahlobogwane Z., Owolawi P. A., and Sokoya O. Multiple Wavelength Propagation in Free Space Optical Wireless Channel // Proc. of International Conf. on Advances in Big Data Computing and Data Communication Systems (icABCD). – 2018. – P. 1-6.
6. Al-Gailani S.A., Mohammad A.B., and Shaddad R.Q. Enhancement of Free Space Optical Link in Heavy Rain Attenuation Using Multiple Beam Concept // Optik (Stuttg). – 2013. – Vol. 124, No. 21. – P. 4798-4801.
7. Noor N.H.M., Naji A.W., and Al-Khateeb W. Performance Analysis of a Free Space Optics Link With Multiple Transmitters/Receivers // IUJ Engineering Journal. – 2012. – Vol. 13, No. 1. – P. 49-58.
8. Kashani F.D., Mahzoun M.R., and Ghafary B. Beam Propagation Analysis of a Multi Beam FSO System With Partially Flat-topped Laser Beams in Turbulent Atmosphere // Optik (Stuttg). – 2012. – Vol. 123, No. 10. – P. 879-886.
9. Manea V., Petre M., Pusocci S., and Stoichescu D.A. The Approach of Wavelength Dense Multiplexing Using Free Space Optical Systems // Proc. of International Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). – 2016. – P. 1-6.
10. Bloom S., Korevaar E., Schuster J., and Willebrand H. Understanding the Performance of Free-space Optics // Journal of Optical Networking. – 2003. – Vol. 2, No. 6. – P. 178-200.
11. Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Nadeem F., Khan M.S., and Capsoni C. Distribution Function for Continental and Maritime Fog Environments for Optical Wireless Communication // Proc. of International Conf. on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. – 2008. – P. 260-264.
12. Nadeem F., Kvicera V., Awan M. S., Leitgeb E., Muhammad S. S., and Kandus G. Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link // IEEE Journal on Selected Areas Communication. – 2009. – Vol. 27, No. 9. – P. 1687-1697.
13. Nadeem F., Leitgeb E., Awan M.S., and Kandus G. Optical Wavelengths Comparison for Different Weather Conditions // Proc. of International Conf. on Satellite and Space Communications. – 2009. – P. 279-283.
14. Alkholidi A. and Altowij K. Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia // Optical Communication System. – 2012. – P. 41.
15. Achour M. Simulating Atmospheric Free-Space Optical Propagation: Rainfall Attenuation // In Free-Space Laser Communication Technologies. – 2002. – XIV, Vol. 4635. – P. 192-201.
16. Carbonneau T.H. and Wisely D.R. Opportunities and Challenges for Optical Wireless: The Competitive Advantage of Free Space Telecommunications Links in Today's Crowded Marketplace // In Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical. – 1998. – Vol. 3232. – P. 119-128.
17. Akiba M., Ogawa K., Wakamori K., Kodate K., and Ito S. Measurement and Simulation of the Effect of Snowfall on Free-space Optical Propagation // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47, No. 31. – P. 5736-5743.
18. Awan M.S. Statistical-dynamical Channel Modeling of Outdoor Optical Wireless Links, 2010.
19. Электронный ресурс: OptiSystem – Getting Started: Optical Communication System Design Software, Version 12. – URL: <https://optiwave.com/?wpdmdl=157>.
20. Murdas I. A. and Abbas Y. K. Design and Simulation of WDM-UWB Based OWC System // Journal of University of Babylon. – 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 893-906.
21. Горбунов А.В., Зачиняев Ю.В., Плёткин А.П. Проектирование защищённых оптических телекоммуникационных систем. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 126 с.

REFERENCES

1. *Mohammad A.B.* Optimization of FSO System in Tropical Weather Using Multiple Beams, *Proc. of International Conf. on IEEE Photonics (ICP)*, 2014, pp. 109-112.
2. *Efimova Yu.I., Proshchenok E.V., Romenskiy M.V. Unru P.P.* Besprovodnaya opticheskaya svyaz' v ul'traioletovom S-diapazone [Wireless optical communication in the ultraviolet C-band], *Modern science*, 2021, No. 4-1, pp. 445-450.
3. *Poller B.V., Britvin A.V. Nikitenko N.S., Shchetinin Yu.I.* Atmosferye ul'traioletovye linii svyazi. Metody postroeniya i kharakteristiki [Atmospheric ultraviolet communication lines. Methods of construction and characteristics], *XXV mezhdunarodnyy simpozium «Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery» [XXV International Symposium "Optics of the atmosphere and ocean. Physics of the atmosphere"]*. Novosibirsk, 2019, pp. V261-V264.
4. *Ahmed A., Singh A., Singh A., and Kaur S.* Performance Analysis of WDM-MIMO Free Space Optical System Under Atmospheric Turbulence, *Proc. of International Conf. on Signal Processing and Integrated Networks*, 2019, pp. 820-825.
5. *Mahlobogwane Z., Owolawi P. A., and Sokoya O.* Multiple Wavelength Propagation in Free Space Optical Wireless Channel, *Proc. of International Conf. on Advances in Big Data Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 2018, pp. 1-6.
6. *Al-Gailani S.A., Mohammad A.B., and Shaddad R.Q.* Enhancement of Free Space Optical Link in Heavy Rain Attenuation Using Multiple Beam Concept, *Optik (Stuttg)*, 2013, Vol. 124, No. 21, pp. 4798-4801.
7. *Noor N.H.M., Naji A.W., and Al-Khateeb W.* Performance Analysis of a Free Space Optics Link With Multiple Transmitters/Receivers, *IJUM Engineering Journal*, 2012, Vol. 13, No. 1, pp. 49-58.
8. *Kashani F.D., Mahzoun M.R., and Ghafary B.* Beam Propagation Analysis of a Multi Beam FSO System With Partially Flat-topped Laser Beams in Turbulent Atmosphere, *Optik (Stuttg)*, 2012, Vol. 123, No. 10, pp. 879-886.
9. *Manea V., Petre M., Pusocci S., and Stoichescu D.A.* The Approach of Wavelength Dense Multiplexing Using Free Space Optical Systems, *Proc. of International Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2016, pp. 1-6.
10. *Bloom S., Korevaar E., Schuster J., and Willebrand H.* Understanding the Performance of Free-space Optics, *Journal of Optical Networking*, 2003, Vol. 2, No. 6, pp. 178-200.
11. *Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Nadeem F., Khan M.S., and Capsoni C.* Distribution Function for Continental and Maritime Fog Environments for Optical Wireless Communication, *Proc. of International Conf. on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, 2008, pp. 260-264.
12. *Nadeem F., Kvicera V., Awan M. S., Leitgeb E., Muhammad S. S., and Kandus G.* Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link, *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2009, Vol. 27, No. 9, pp. 1687-1697.
13. *Nadeem F., Leitgeb E., Awan M.S., and Kandus G.* Optical Wavelengths Comparison for Different Weather Conditions, *Proc. of International Conf. on Satellite and Space Communications*, 2009, pp. 279-283.
14. *Alkholidi A. and Altowij K.* Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia, *Optical Communication System*, 2012, pp. 41.
15. *Achour M.* Simulating Atmospheric Free-Space Optical Propagation: Rainfall Attenuation, *In Free-Space Laser Communication Technologies*, 2002, XIV, Vol. 4635, pp. 192-201.
16. *Carbonneau T.H. and Wisely D.R.* Opportunities and Challenges for Optical Wireless: The Competitive Advantage of Free Space Telecommunications Links in Today's Crowded Marketplace, *In Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical*, 1998, Vol. 3232, pp. 119-128.
17. *Akiba M., Ogawa K., Wakamori K., Kodate K., and Ito S.* Measurement and Simulation of the Effect of Snowfall on Free-space Optical Propagation, *Applied Optics*, 2008, Vol. 47, No. 31, pp. 5736-5743.
18. *Awan M.S.* Statistical-dynamical Channel Modeling of Outdoor Optical Wireless Links, 2010.
19. Электронный ресурс: OptiSystem – Getting Started: Optical Communication System Design Software, Version 12. Available at: <https://optiwave.com/?wpdmml=157>.

20. *Murdas I. A. and Abbas Y. K.* Design and Simulation of WDM-UWB Based OWC System, *Jurnal of University of Babylon*, 2016, Vol. 24, No. 4, pp. 893-906.
21. *Горбунов А.В., Зачиняев Ю.В., Плёткин А.П.* Проектирование защищённых оптических телекоммуникационных систем. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019, 126 p.

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

Жилин Сергей Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: szhilin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Архипенко Владимир Владимирович – e-mail: arkhipenko@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Басан Елена Сергеевна – e-mail: ebasan@sfedu.ru; кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; доцент.

Поленов Максим Юрьевич – e-mail: mypolenov@sfedu.ru; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Zhilin Sergey Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: szhilin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of computer engineering; master's student.

Arkhipenko Vladimir Vladimirovich – e-mail: arkhipenko@sfedu.ru; the department of computer engineering; master's student.

Basan Elena Sergeevna – e-mail: ebasan@sfedu.ru; the department of information technology security; cand. of eng. sc.; associate professor.

Polenov Maxim Yuryevich – e-mail: mypolenov@sfedu.ru; phone: +78634371550; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-126-135

Н.Н. Прокопенко, В.Е. Чумаков, А.В. Бугакова, А.Е. Титов

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С УПРАВЛЯЮЩИМ PN-ПЕРЕХОДОМ*

Систематическая составляющая напряжения смещения нуля ($U_{см}$) двухкаскадных ВЛТ и CMOS операционных усилителей (ОУ) с классической архитектурой существенно зависит от численных значений (отличия от единицы) коэффициента передачи по току ($K_i \approx 1$) применяемых токовых зеркал (ТЗ). На данный параметр ТЗ оказывает также влияние напряжения Эрли их доминирующих активных компонентов. Поэтому, токовые JFET зеркала являются сегодня слабым звеном в современной JFET аналоговой схемотехнике и их нецелесообразно применять в структуре JFET ОУ. В статье поставлена и решена задача об условиях исключения ТЗ в ОУ на основе полевых транзисторов с управляющим pn-переходом для случая, когда необходимо получить малое значение $U_{см}$. Предлагаются варианты практических схем входных (ВК) и промежуточных (ПК) каскадов микроэлектронных операционных усилителей на комплементарных полевых транзисторах с управляющим pn-переходом (CJFET). Их основная особенность – отсутствие токового зеркала, которое при реализации на CJFET отрицательно влияет на основные параметры ОУ по систематической составляющей напряжения смещения нуля, коэффициентам ослабления входного синфазного сигнала и подавления помех по шинам питания. В этой связи перспективны схемы ВК и ПК, которые не используют данный CJFET функциональный узел. Приведены схемы операционных усилителей на основе разработанных ВК с разомкнутым коэффициентом усиления более 80 дБ и систематической составляющей напряжения смещения нуля в

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).

пределах 300 мкВ при малом токопотреблении в статическом режиме. Актуальность выполненных исследований заключается в необходимости развития теории проектирования высокоточных JFET и CJFET IP-модулей для применения в структурах малошумящих аналоговых интерфейсов датчиков различных физических величин, в том числе работающих в тяжелых условиях эксплуатации (воздействие низких температур и радиации). Предлагаемые схемы могут быть реализованы на широкозонных полупроводниках (SiC JFET, GaN JFET или GaAs JFET).

Аналоговые интерфейсы датчиков; операционный усилитель; комплементарные полевые транзисторы с управляющим pn-переходом; тяжелые условия эксплуатации; систематическая составляющая напряжения смещения нуля.

N.N. Prokopenko, V.E. Chumakov, A.V. Bugakova, A.E. Titov

FEATURES OF THE CIRCUITRY OF OPERATIONAL AMPLIFIERS BASED ON COMPLEMENTARY FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH A CONTROL PN-JUNCTION

The systematic component of the offset voltage (V_{off}) of two-stage BJT and CMOS operational amplifiers (Op-Amps) with classical architecture significantly depends on the numerical values (difference from unity) of the current transfer coefficient ($K_{\approx 1}$) of the current mirrors (CM) used. This parameter of CM is also influenced by the Earley stress of their dominant active components. Current JFET mirrors are today a weak link in modern JFET analog circuitry and they are impractical to use in the structure of JFET Op-Amps. The article posed and solved the problem of the conditions for the elimination of CM in an Op-Amps based on field-effect transistors with a control pn-junction for the case when it is necessary to obtain a small V_{off} . Variants of practical circuits of input (InS) and intermediate (IntS) stages of microelectronic operational amplifiers based on complementary field-effect transistors with a control pn-junction (CJFET) are proposed. Their main feature is the absence of a current mirror, which, when implemented on a CJFET, negatively affects the main parameters of the Op-Amps in terms of the systematic component of the offset voltage, the attenuation coefficients of the input common-mode signal, and the suppression of noise on the power buses. In this regard, InSs and IntSs circuits are promising, which do not use this CJFET functional unit. The circuits of Op-Amps based on the developed InSs with an open gain of more than 80 dB and a systematic component of the offset voltage within 300 μ V with low current consumption in a static mode are presented. The relevance of the performed studies lies in the need to develop the theory of designing high-precision JFET and CJFET IP-modules for use in structures of low-noise analog interfaces of sensors of various physical quantities, including those operating in severe operating conditions (exposure to low temperatures and radiation) The proposed circuits can be implemented on wide-gap semiconductors (SiC JFET, GaN JFET or GaAs JFET).

Analog sensor interfaces; operational amplifier; complementary field-effect transistors with a control pn-junction; hard service condition; systematic component of the offset voltage.

Введение. Классическая схемотехника BJT и CMOS операционных усилителей (ОУ) [1–3] базируется на широком использовании так называемых токовых зеркал [1]. Это – базовый функциональный элемент современной аналоговой микроэлектроники [1–8], оказывающий существенное влияние как на статические (напряжение смещения нуля, коэффициент ослабления входных синфазных сигналов и т.п.), так и динамические параметры ОУ (коэффициент усиления по напряжению, предельные значения частоты единичного усиления, максимальная скорость нарастания выходного напряжения и т.п.). Анализ схемотехники серийных BiJFET ОУ с JFET входными транзисторами показывает, что здесь токовые зеркала всегда реализуются на биполярных транзисторах (LT1484, OP128, OPA627/637, OPA11 и др.). Однако такое решение не способствует обеспечению малого уровня шумов, а также не гарантирует надежную работу ОУ при воздействии криогенных температур и проникающей радиации.

Цель и новизна статьи состоит в исследовании свойств перспективных структур входных (ВК) и промежуточных (ПК) каскадов [9], в которых за счет симметрии статического режима обеспечивается уменьшение систематической составляющей напряжения смещения нуля ($U_{см}$) в ОУ на их основе.

1. Постановка задачи. Несовершенство токовых зеркал (отличие их коэффициента передачи по току от единицы, инерционность K_i при обработке входных высокочастотных токовых сигналов, температурные и радиационные изменения K_i) ограничивают предельные характеристики современных ОУ. В этой связи данному функциональному узлу аналоговых микросхем уделяется большое внимание – сегодня существует более 100 вариантов их построения [1, 4], в которых за счет усложнения классических решений [5, 6] достигаются те или иные улучшения параметров токовых зеркал (ТЗ). Тем не менее, токовое зеркало по-прежнему является одним из слабых звеньев в современной быстродействующей и прецизионной аналоговой микроэлектронике. Особенно остро данная проблема проявляется в JFET операционных усилителях [7, 8], в рамках которых нет приемлемых схемотехнических решений ТЗ [4].

2. Входные каскады CJFET ОУ с парафазным выходом. Предлагаемые схемы ВК рис. 1,а и рис. 1,б выполнены на дифференциальном усилителе ДК1, который реализован на полевых транзисторах VT1 и VT2 и источнике опорного тока I_1 . Схема имеет высокую симметрию статического режима транзисторов, что является необходимым условием минимизации её влияния на $U_{см}$. К выходам Вых. 1 и Вых.2 подключаются дифференциальные входы промежуточного каскада, который обеспечивает дополнительное усиление по напряжению и согласование ВК с буферным усилителем.

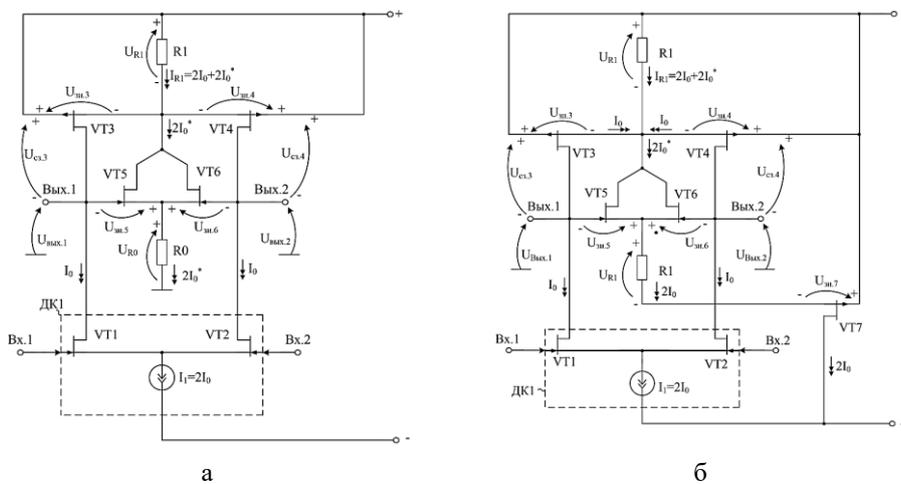


Рис. 1. Перспективные архитектуры низкотемпературных и радиационно-стойких CJFET входных каскадов ОУ

Стабильность статических напряжений на выходах Вых.1 и Вых.2 обеспечивается цепью отрицательной обратной связи (ООС) по синфазному сигналу, которая реализуется на транзисторах VT5 и VT6. Для повышения предельных значений коэффициента усиления (K_{y1}) в схеме рис. 1а вместо VT1 и VT2, VT3 и VT4 транзисторов целесообразно применение каскодных составных транзисторов. Это позволит повысить K_{y1} и уменьшить $U_{см}$ ОУ, обусловленную погрешностью промежуточного каскада. Возможно выполнение токостабилизирующего элемента (VT5 и VT6) схемы рис. 1,а с использованием резистора R0 и JFET VT7 (см. рис. 1,б).

Зависимость выходных дифференциальных напряжений ВК рис. 1,б от входного дифференциального напряжения при температуре -197°C , напряжениях питания $\pm 5\text{В}$, резисторе $R1=5\text{кОм}$, источнике опорного тока $I_1=200\text{мкА}$, показана на рис. 2. Моделирование проводилось в среде LTSpice на CJFET транзисторах JP50_2 и JN260_2 ОАО «Интеграл» (г. Минск, Беларусь) [10–12].

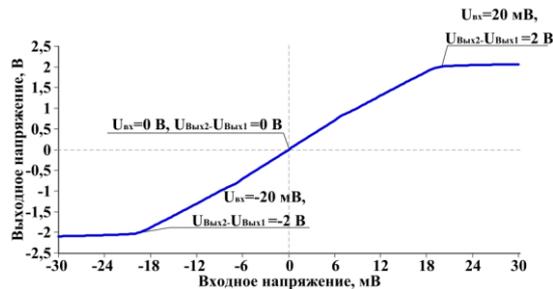


Рис. 2. Зависимость дифференциального выходного напряжения ($U_{\text{Вых.2}} - U_{\text{Вых.1}}$) ВК рис. 1б от входного дифференциального напряжения при температуре -197°C

Основная особенность схем ВК рис. 1,а и рис. 1,б состоит в нетрадиционном введении сигнала отрицательной обратной связи по выходному синфазному сигналу, которая реализуется за счет резистора $R1$ и транзистора $VT7$. Такое схемотехническое решение обеспечивает работу схемы при низких температурах, а также в условиях проникающей радиации.

3. Особенности промежуточных каскадов CJFET ОУ. Промежуточный каскад в схеме рис. 3,а реализован на транзисторах $VT7$, $VT8$ и токовым зеркалом $PT1$. Такое решение возможно только в том случае, если входной каскад имеет большой K_{y1} по напряжению и, как следствие, погрешности некачественного токового зеркала $PT1$ могут оказывать слабое влияние на общую систематическую составляющую напряжения смещения нуля ОУ.

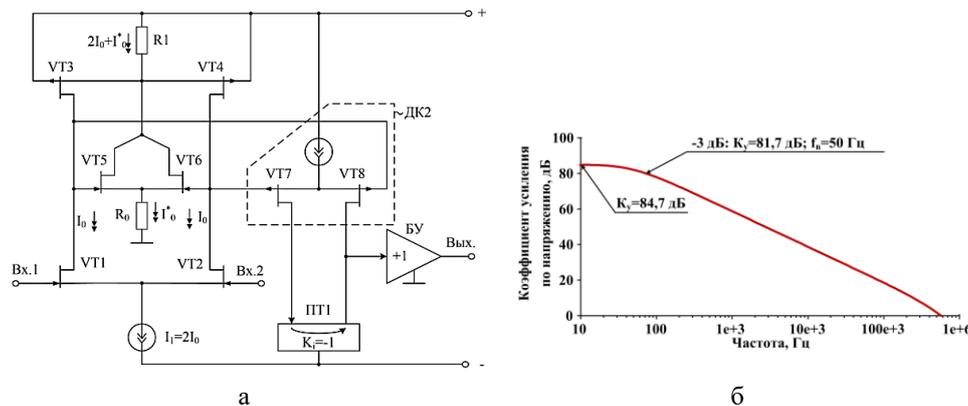


Рис. 3. Низкотемпературный CJFET ОУ (а) на основе входного каскада рис. 1,а и его ЛАЧХ при $t=-197^{\circ}\text{C}$

Моделирование схемы ОУ рис. 3а в среде LTSpice на CJFET транзисторах ОАО «Интеграл» (г. Минск, Беларусь) показало (рис. 3б), что логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) коэффициента усиления по напряжению разомкнутого ОУ достигает 84,7 дБ при температуре -197°C .

На рис. 4 приведена температурная зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ рис. 3а, которая изменяется в пределах 300 мкВ.

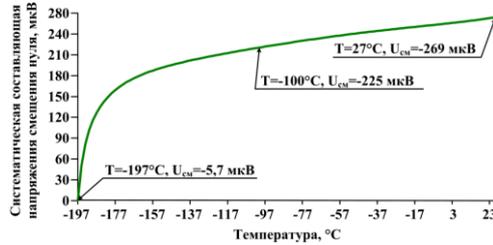


Рис. 4. Зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ рис. 3а от $t = -197^{\circ}\text{C} \div 27^{\circ}\text{C}$

Замечательная особенность промежуточного каскада на рис. 5 состоит в том, что в нем обеспечиваются малые значения систематической составляющей напряжения смещения нуля ($U_{см2}$) за счет специального построения цепи стабилизации статического тока дифференциального каскада на транзисторах VT7 (VT8) и схемы его динамической нагрузки на транзисторе VT11. Это позволяет минимизировать ошибку по $U_{см2}$ промежуточного каскада, которая будет приводиться на вход ОУ через его коэффициент усиления по напряжению K_{v1} входного каскада.

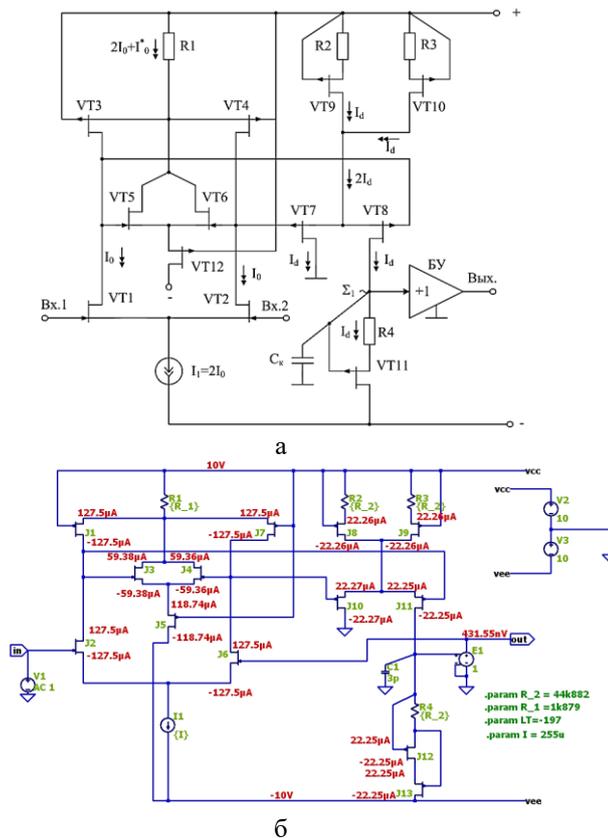


Рис. 5. C/JFET ОУ (а) и его статический режим после оптимизации (б) в среде LTSpice при температуре -197°C

Систематическую составляющую напряжения смещения нуля $U_{см2}$ промежуточного каскада на транзисторах VT7 и VT8 (рис. 5,а) можно оценить по формуле:

$$U_{см2} = \frac{\Delta I_{\Sigma}}{S_2}, \quad (1)$$

где $\Delta I_{\Sigma} = I_{с.8} - I_{R4} - I_{бу}$ – статическая ошибка по выходному току в цепи высокоимпедансного узла Σ_1 ; $I_{с.8}$ – статический ток стока транзистора VT8; I_{R4} – выходной статический ток динамической нагрузки на транзисторе VT11; $I_{бу} \approx 0$ – входной ток буферного усилителя (БУ); $S_2 = (S_7 \cdot S_8)/(S_7 + S_8)$ – крутизна преобразования входного напряжения промежуточного каскада (VT7 и VT8) в выходной ток высокоимпедансного узла Σ_1 ; $S_7 \approx S_8$ – крутизна стоко-затворных характеристик транзисторов VT7 и VT8.

За счет выполнения общей истоковой цепи VT7 и VT8 в виде двух источника опорного тока на транзисторах VT9 (VT10) и такого же построения динамической нагрузки на транзисторе VT11, в схеме ОУ на рис. 5,а при $I_{бу} = 0$ обеспечивается малое значение разностного тока ошибки $\Delta I_{\Sigma} \approx 0$ в высокоимпедансном узле Σ_1 . Как следствие, $U_{см2}$ промежуточного каскада (1) близко к нулю. Этому также способствует идентичность статических напряжений затвор-сток транзисторов VT7 и VT8.

Коэффициент усиления по напряжению ОУ на рис. 5,а определяется уравнением

$$K_y = K_{y1} \cdot R_{\Sigma} \cdot S_2, \quad (2)$$

где K_{y1} – коэффициент усиления входного каскада; R_{Σ} – эквивалентное сопротивление высокоимпедансного узла Σ_1 . Численные значения R_{Σ} определяются выходным сопротивлением по цепи стока транзистора VT8 и выходным сопротивлением динамической нагрузки $R_{дн}$ на транзисторе VT11, причем

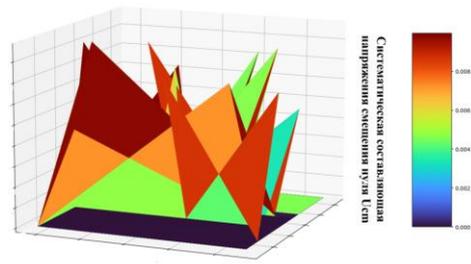
$$R_{дн} \approx \frac{R_4}{\mu_{11}}, \quad (3)$$

где $\mu_{11} = 10^{-3} \div 10^{-4}$ – коэффициент внутренней обратной связи транзистора VT11 в схеме с общим затвором.

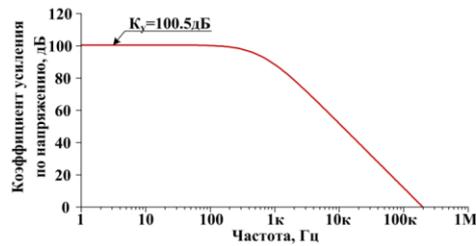
Результаты оптимизации схемы CJFET ОУ (рис. 5,б) в среде LTSpice позволили определить при каких параметрах резисторов будут реализованы минимальные значения систематической составляющей напряжения смещения нуля (рис. 6,а) и максимальные значения коэффициента усиления по напряжению (рис. 6,б).

Так, систематическая составляющая напряжения смещения нуля оптимизированной схемы ОУ на рис. 5,а достигает значения $U_{см} = 2 \text{ мкВ}$ при сопротивлениях $R1 = 1,48 \text{ кОм}$, $R2 = R3 = R4 = 27,8 \text{ кОм}$.

4. CJFET ОУ с промежуточным каскадом на основе «перегнутого» каскада. На рис. 7 представлен пример подключения входного каскада рис. 1б к промежуточному каскаду, реализованного на резисторах R2 и R3, транзисторах VT6 и VT7, а также динамической нагрузке на транзисторе VT8 и резисторе R4. Данное схемотехническое решение позволяет получить максимальные выходные напряжения ОУ, близкие к напряжениям питания.



а



б

Рис. 6. График процесса оптимизации ОУ рис. 5б (а) и ЛАЧХ коэффициента усиления ОУ по напряжению (б)

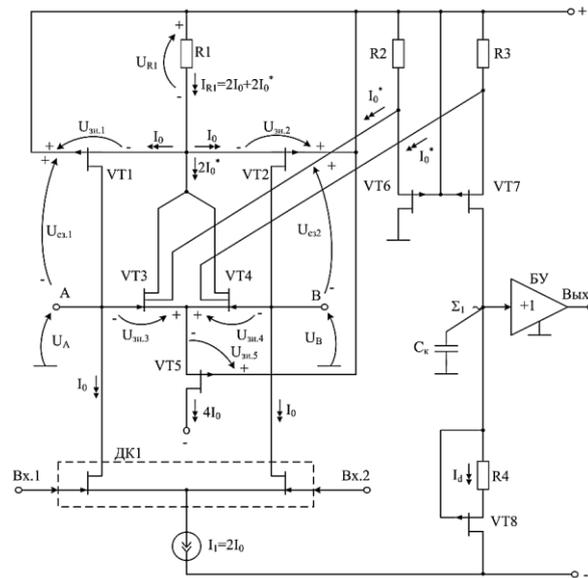


Рис. 7. CJFET ОУ с промежуточным каскадом на основе «перегнутого» каскода

Заключение. В аналоговой BiJFET, JFET и CJFET схемотехнике сегодня существует проблема построения прецизионных JFET токовых зеркал (ТЗ) с коэффициентом передачи по току K_t , близким к единице в широком диапазоне изменения входных токов. Простое «клонирование» (повторение) схемотехники ТЗ для JFET из BJT и CMOS технологий не дает удовлетворительного результата при высоких требованиях к точности получения $K_t=1$. Это отрицательно сказывается на статических и динамических параметрах ОУ с классической архитектурой.

Рассмотренные в настоящей статье схемотехнические приемы применимы для низкотемпературных микросхем ОУ, реализованных на базе полевых транзисторов с управляющим рп-переходом для задач космического приборостроения и физики высоких энергий. При этом применение кремниевых, GaAs, а также SiC комплементарных полевых транзисторов с управляющим рп-переходом (СJFET) [13, 14] позволяет создавать аналоговые устройства [15–17], в том числе датчиковые системы, для работы в широком диапазоне температур [18,19] и воздействии потока нейтронов [20, 21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Johns D., Martin K.* Analog integrated circuit design // John Wiley & Sons. – New York, 2011. – 2nd ed. – 819 p.
2. *Bharath R.R., Gowda S.K.* Design and Analysis of CMOS Two Stage OP-AMP in 180nm and 45nm Technology // IJERT. – 2015. – Vol. 4. No. 5. – P. 1100-1103.
3. *Shukla N., Kaur J.* Analysis of Two Stage CMOS Opamp using 90nm Technology // IJET. – 2017. – Vol. 9. – P. 66-72. – DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i3/170903S013.
4. *Bryant J.* Current-output circuit techniques add versatility to your analog toolbox // Analog Dialogue. – 2014. – Vol. 48. – P. 2.
5. *Bastan Y., Hamzehil E., Amiri P.* Output impedance improvement of a low voltage low power current mirror based on body driven technique // Microelectronics Journal. – 2016. – Vol. 56. – P. 163-170.
6. *Aggarwal B., Gupta M., Gupta A.K.* A comparative study of various current mirror configurations: Topologies and characteristics // Microelectronics Journal. – 2016. – Vol. 53. – P. 134-155.
7. *Snoeij M.* A 36V 48MHz JFET-Input Bipolar Operational Amplifier with 150 μ V Maximum Offset and Overload Supply Current Control // ESSCIRC 2018-IEEE 44th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC). – IEEE, 2018. – P. 290-293. – DOI: 10.1109/ESSCIRC.2018.8494262.
8. *Alnasser E.* A Novel Low Output Offset Voltage Charge Amplifier for Piezoelectric Sensors // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20, No. 10. – P. 5360-5367. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.2970839.
9. *Bugakova A., Prokopenko N., Titov A.* Design of Low-Temperature and Radiation-Hardened JFET Direct Coupled Op-Amps without Current Mirrors // 2020 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). – IEEE, 2020. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ECCTD49232.2020.9218291.
10. *Dvornikov O.V., Dziaitlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Bugakova A.V.* Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTspice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study // 2020 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC). – IEEE, 2020. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/LAEDC49063.2020.9073004.
11. *Drozдов D.G., Prokopenko N.N., Savchenko E.M., Dukanov P.A., Rodin V.G., Grushin A.I.* Technological and devices modeling of complementary JFETs over a wide temperature range // Microelectronics Journal. – 2020. – Vol. 105. – P. 104911.
12. *Жук А.А., Савченко Е.М., Дроздов Д.Г., Будяков П.С.* Экспериментальные исследования основных параметров CJFET транзисторов с различными конструкциями для задач проектирования интерфейсов датчиков при воздействии низких температур и радиации // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. – 2019. – С. 224-224.
13. *Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L.M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I.A.* Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the – 200...+ 110° C temperature range // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2018. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337212.
14. *Sotskov D. I., Usachev N. A., Elesin V. V., Metelkin I. O., Zhidkov N. M., Nikiforov A. Y.* Compact Models for Radiation Hardening by Design of SiGe BiCMOS, GaAs and SOI CMOS Microwave Circuits // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337212.
15. *Llaria A., Jiménez J., Bidarte U., CUREA O.* Operational Amplifiers in Discrete Time Control Systems: Influence of the Rail-to-Rail Feature on their Performance // WSEAS Transactions on Electronics. – 2008. – Vol. 5. – P. 25-34.

16. *Berry C.A., Walter D.J.* Application of Operational Amplifiers // *Fundamentals of Industrial Electronics*. – CRC Press, 2018. – P. 5-1-5-30.
17. *Дубовой С.С., Шкуша И.О., Титов И.Л.* Контроль работы электрических, электронных установок и систем управления на примере современных электронных усилителей // *Современные тенденции практической подготовки в морском образовании*. – 2020. – С. 14-21.
18. *Neudeck P., Spry D., Krasowski M., Chen L., Prokop N., Greer L., Chang, C.* Progressing-190° C to+ 500° C Durable SiC JFET ICs From MSI to LSI // 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). – IEEE, 2020. – P. 27.2. 1-27.2. 4. – DOI: 10.1109/IEDM13553.2020.9371953.
19. *Patterson R.L., Hammoud A., Dickman J.E., Gerber S., Elbuluk M. and Overton E.* Electronics for deep space cryogenic applications // *Low Temperature Electronics, 2002: Proceedings of the 5th European Workshop on*. – 2002. – P. 207-210.
20. *Vikulin I., Gorbachev V., Gorbacheva A., Krasova V., Litvinenko V.* Radiation resistant FET-based Temperature Sensor for End Devices of IoT // 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). – IEEE. 2019. – P. 272-277. – DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847905.
21. *Bakerenkov A., Pershenkov V., Felitsyn V., Rodin A., Telets V., Belyakov V., Zhukov A., Gluhov N.* Correlation between Temperature and Dose Rate Dependences of Input Bias Current Degradation in Bipolar Operational Amplifiers // 2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL). – IEEE. 2019. – P. 341-344. – DOI: 10.1109/MIEL.2019.8889589.

REFERENCES

1. *Johns D., Martin K.* Analog integrated circuit design // John Wiley & Sons. New York, 2011. 2nd ed., 819 p.
2. *Bharath R.R., Gowda S.K.* Design and Analysis of CMOS Two Stage OP-AMP in 180nm and 45nm Technology, *IJERT*, 2015, Vol. 4. No. 5, pp. 1100-1103.
3. *Shukla N., Kaur J.* Analysis of Two Stage CMOS Opamp using 90nm Technology, *IJET*, 2017, Vol. 9, pp. 66-72. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i3/170903S013.
4. *Bryant J.* Current-output circuit techniques add versatility to your analog toolbox, *Analog Dialogue*, 2014, Vol. 48, pp. 2.
5. *Bastan Y., Hamzehil E., Amiri P.* Output impedance improvement of a low voltage low power current mirror based on body driven technique, *Microelectronics Journal*, 2016, Vol. 56, pp. 163-170.
6. *Aggarwal B., Gupta M., Gupta A.K.* A comparative study of various current mirror configurations: Topologies and characteristics, *Microelectronics Journal*, 2016, Vol. 53, pp. 134-155.
7. *Snoeij M.* A 36V 48MHz JFET-Input Bipolar Operational Amplifier with 150 μ V Maximum Offset and Overload Supply Current Control, *ESSCIRC 2018-IEEE 44th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*. IEEE, 2018, pp. 290-293. DOI: 10.1109/ESSCIRC.2018.8494262.
8. *Alnasser E.* A Novel Low Output Offset Voltage Charge Amplifier for Piezoelectric Sensors, *IEEE Sensors Journal*, 2020, Vol. 20, No. 10, pp. 5360-5367. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2970839.
9. *Bugakova A., Prokopenko N., Titov A.* Design of Low-Temperature and Radiation-Hardened JFET Direct Coupled Op-Amps without Current Mirrors, *2020 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*. IEEE, 2020, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ECCTD49232.2020.9218291.
10. *Dvornikov O.V., Dzatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Bugakova A.V.* Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTspice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study, *2020 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC)*. IEEE. 202, pp. 1-4. DOI: 10.1109/LAEDC49063.2020.9073004.
11. *Drozdov D.G., Prokopenko N.N., Savchenko E.M., Dukanov P.A., Rodin V.G., Grushin A.I.* Technological and devices modeling of complementary JFETs over a wide temperature range, *Microelectronics Journal*, 2020, Vol. 105, pp. 104911.
12. *Zhuk A.A., Savchenko E.M., Drozdov D.G., Budyakov P.S.* Eksperimental'nye issledovaniya osnovnykh parametrov CJFET tranzistorov s razlichnymi konstruktsiyami dlya zadach proektirovaniya interfeysov datchikov pri vozdeystvii nizkikh temperatur i radiatsii [Experimental studies of the main parameters of CJFET transistors with various designs for the problems of designing sensor interfaces under the influence of low temperatures and radiation], *Fiziko-tekhnicheskie problemy v nauke, promyshlennosti i meditsine* [Physical and technical problems in science, industry and medicine], 2019, pp. 224-224.

13. *Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L.M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I.A.* Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the – 200...+ 110° C temperature range, *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. IEEE, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337212.
14. *Sotskov D. I., Usachev N. A., Elesin V. V., Metelkin I. O., Zhidkov N. M., Nikiforov A. Y.* Compact Models for Radiation Hardening by Design of SiGe BiCMOS, GaAs and SOI CMOS Microwave Circuits, *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE, 2021, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337212.
15. *Llaria A., Jiménez J., Bidarte U., Curea O.* Operational Amplifiers in Discrete Time Control Systems: Influence of the Rail-to-Rail Feature on their Performance, *WSEAS Transactions on Electronics*, 2008, Vol. 5, pp. 25-34.
16. *Berry C.A., Walter D.J.* Application of Operational Amplifiers, *Fundamentals of Industrial Electronics*. CRC Press, 2018, pp. 5-1-5-30.
17. *Dubovoy S.S., Shiksha I.O., Titov I.L.* Kontrol' raboty elektricheskikh, elektronnykh ustanovok i sistem upravleniya na primere sovremennykh elektronnykh usiliteley [Control of the operation of electrical, electronic installations and control systems on the example of modern electronic amplifiers], *Sovremennye tendentsii prakticheskoy podgotovki v morskoy obrazovanii* [Modern trends in practical training in maritime education], 2020, pp. 14-21.
18. *Neudeck P., Spry D., Krasowski M., Chen L., Prokop N., Greer L., Chang, C.* Progressing-190° C to+ 500° C Durable SiC JFET ICs From MSI to LSI, *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. IEEE, 2020, pp. 27.2. 1-27.2. 4. DOI: 10.1109/IEDM13553.2020.9371953.
19. *Patterson R.L., Hammoud A., Dickman J.E., Gerber S., Elbuluk M. and Overton E.* Electronics for deep space cryogenic applications, *Low Temperature Electronics, 2002: Proceedings of the 5th European Workshop on*, 2002, pp. 207-210.
20. *Vikulin I., Gorbachev V., Gorbacheva A., Krasova V., Litvinenko V.* Radiation resistant FET-based Temperature Sensor for End Devices of IoT, *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*. IEEE. 2019, pp. 272-277. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847905.
21. *Bakerenkov A., Pershenkov V., Felitsyn V., Rodin A., Telets V., Belyakov V., Zhukov A., Gluhov N.* Correlation between Temperature and Dose Rate Dependences of Input Bias Current Degradation in Bipolar Operational Amplifiers, *2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*. IEEE. 2019, pp. 341-344. DOI: 10.1109/MIEL.2019.8889589.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Н. Галушкин

Прокопенко Николай Николаевич – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79185182266; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой «Информационные системы и радиотехника».

Чумаков Владислав Евгеньевич – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; тел.: +79895020032; аспирант кафедры «Информационные системы и радиотехника»; инженер Управления научных исследований.

Бугакова Анна Витальевна – e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; тел.: +79094169380; младший научный сотрудник Управления научных исследований.

Титов Алексей Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: alex.evgeny.titov@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79614322223; к.т.н.; доцент кафедры «Системы автоматического управления».

Prokopenko Nikolay Nikolayevich – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79185182266; dr. of eng. sc.; professor; head of the department of Information Systems and Radio Engineering.

Chumakov Vladislav Evgenievich – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; phone: +79895020032; graduate student of the department of Information Systems and Radio Engineering; research engineer of Scientific Research.

Bugakova Anna Vitalievna – e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; phone: +79094169380; junior research fellow of the Office of Scientific Research.

Titov Alexey Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: alex.evgeny.titov@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79614322223; cand. of eng. sc.; associate professor of the department of Automatic Control Systems.

Д.Л. Газдинский, О.М. Чапура, Л.В. Михнев, Е.А. Бондаренко,
Р.В. Пигулев, У.А. Марьяна

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ОКСИДА ЦИНКА ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

В настоящее время актуальным направлением является поиск функциональных слоев для различных оптоэлектронных устройств. Перспективным кандидатом в качестве основы для многих подобных структур является оксид цинка (ZnO), сочетающий в себе ряд уникальных оптических и фотоэлектрических свойств. Однако, характеристики тонких плёнок ZnO могут существенно различаться в зависимости от выбранного метода синтеза и конкретных условий получения. Одной из разновидностей золь-гель метода, подходящей для синтеза плёнок нанометрового масштаба, является метод вертикального вытягивания. Поэтому, в этой работе представлены результаты синтеза тонких плёнок ZnO, полученных на стеклянных подложках методом вертикального вытягивания из золя оксида цинка. Методами спектральной эллипсометрии и спектральной фотометрии было изучено влияние скорости вытягивания на структурные и оптические свойства синтезированных плёнок ZnO. Методом спектральной эллипсометрии были установлено, что изменение скорости вытягивания существенным образом влияет на толщину и пористость синтезированных слоев оксида цинка. Анализ полученной нами зависимости толщины плёнки от скорости вытягивания показал, что в методе вертикального вытягивания рост оксида цинка на стеклянных подложках возможно реализовывать в двух режимах: в режиме капиллярных сил и в режиме высыхания. В то же время для синтезированных плёнок ZnO методом спектральной фотометрии были измерены спектры пропускания, анализ которых показал влияние скорости вытягивания на положение края собственного поглощения. Было установлено, что основной причиной приводящей к изменению ширины запрещенной зоны в наноразмерных плёнках ZnO является квантовый размерный эффект.

ZnO; тонкие плёнки; золь-гель; метод вертикального вытягивания.

D.L. Gazdinsky, O.M. Chapura, L.V. Mihnev, E.A. Bondarenko,
R.V. Pigulev, Y.A. Mar'ina

STUDY OF THE OPTICAL PROPERTIES OF THIN LAYERS OF ZINC OXIDE ZnO OBTAINED BY THE SOL-GEL METHOD

Currently, the actual direction is the search for functional layers for various optoelectronic devices. A promising candidate as a basis for many such structures is zinc oxide (ZnO), which combines a number of unique optical and photoelectric properties. However, the characteristics of ZnO thin films can vary significantly depending on the chosen synthesis method and specific production conditions. One of the varieties of the sol-gel method suitable for the synthesis of nanoscale films is the dip-coating method. The paper presents the results of the synthesis of thin films of zinc oxide on glass substrates by the method of vertical drawing from ZnO alcohol sol. The effect of the elongation rate on the structural and optical properties of synthesized ZnO films was studied using spectral ellipsometry and spectral photometry. By the method of spectral ellipsometry, it was found that the change in the rate of elongation significantly affects the thickness and porosity of the synthesized zinc oxide layers. The analysis of the obtained dependence of the film thickness on the pulling speed showed that in the vertical pulling method, the growth of zinc oxide on glass substrates can be realized in two modes: in capillary forces mode and in drying mode. At the same time, transmission spectra were measured for synthesized ZnO films by spectral photometry, the analysis of which showed the effect of the elongation rate on the position of the edge of fundamental absorption. It was found that the main cause of the resulting

ZnO; thin films; sol-gel; dip-coating method.

Введение. В последнее время исследователи уделяют большое внимание широкозонным полупроводниковым материалам. К подобным материалам относится оксид цинка, у которого ширина запрещённой зоны составляет 3,36 эВ. Другой особенностью оксида цинка является высокий показатель преломления ($n=2,015$), сочетающийся с высокой прозрачностью в видимой области спектра [1]. Невысокая стоимость, относительно низкая токсичность и простота получения делают тонкие пленки оксида цинка привлекательными для широкого круга применений. Оксид цинка может применяться для производства светоизлучающих диодов и лазеров, работающих в ультрафиолетовой области излучения [2, 3]. Использовать тонкие пленки оксида цинка (ZnO), возможно также в качестве светофильтров [4], просветляющих покрытий [5] и оптических волноводов [6]. Наличие пьезоэлектрического и пироэлектрического эффектов позволяет использовать тонкие пленки ZnO в качестве датчиков температуры [7]. Также в ряде работ отмечаются уникальные фотоэлектрические свойства тонких плёнок ZnO, предоставляющие возможность для их использования в качестве газовых сенсоров [8] и ультрафиолетовых детекторов [9]. Таким образом, можно сделать вывод, что получение тонких плёнок ZnO является актуальным.

Тонкие пленки оксида цинка можно получать различными способами, такими как реактивное магнетронное распыление, химическое осаждение из газовой фазы и т.д. [10–12]. Особый интерес вследствие дешевизны метода и возможности масштабирования представляет метод вертикального вытягивания из растворов [13]. Различные параметры вытягивания могут существенным образом влиять на оптические и структурные свойства тонких плёнок ZnO, которые являются ключевыми для их практического применения [14]. Одним из важных параметров роста плёнок, который оказывает влияние на механизм формирования пленки, является скорость вытягивания подложек из раствора [15]. В предыдущих работах [14, 16] изучение механизмов роста и параметров плёнок ZnO проводилось при больших скоростях вытягивания, когда реализуется рост плёнок в режиме высыхания. Так, например, в работе [16] было показано влияние скорости вытягивания на кристаллическую ориентацию полученных плёнок ZnO. В тоже время, работ посвященных детальному исследованию влияния скорости на оптические и структурные свойства тонких плёнок ZnO, полученных в режиме капиллярных сил, не проводилось. Таким образом, исследование влияния скорости вытягивания подложек на оптические и структурные свойства является актуальным.

Эксперимент. Для синтеза тонких плёнок ZnO был применен золь-гель метод, предполагающий использование золя ZnO. Общая схема синтеза тонких плёнок представлена на рис. 1.

В качестве исходных реактивов для синтеза золя использовался двухводный ацетат цинка ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), моноэтаноламин (MEA). Растворителем служил безводный изопропиловый спирт (C_3H_7OH).

На первом этапе приготовления золя оксида цинка, в 50 миллилитров изопропилового спирта, предварительно нагретого до 60 градусов, добавляли 2,2 грамма ацетата цинка.

Полученный раствор перемешивали в течение получаса при поддержании постоянной температуры. Далее, к готовому раствору добавляли по каплям моноэтаноламин в объёме 0,61 миллилитра и оставляли перемешиваться в течение двух часов. Перед вытягиванием полученный золь выдерживали в течение 24 часов при комнатной температуре.

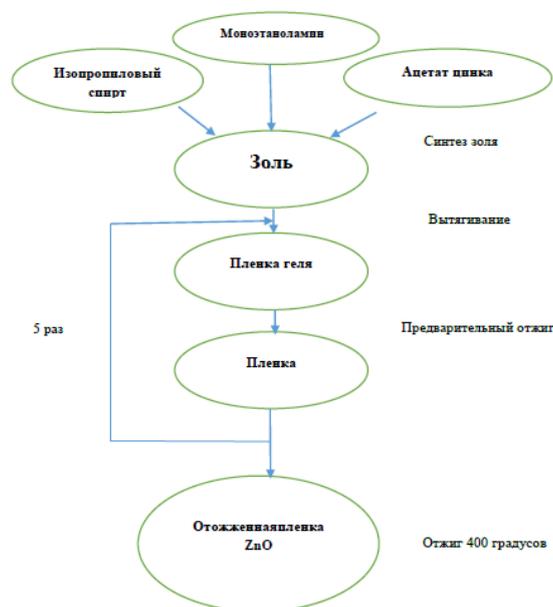


Рис. 1. Схема синтеза тонких плёнок ZnO

Нанесение пленок на подложки осуществлялось методом вертикального вытягивания. Пленки ZnO наносились на стеклянные подложки, предварительно отмытые в хромовой смеси. Скорость вытягивания подложек из раствора поддерживалась постоянной и для разных образцов составляла 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 2; 5; 10; 20 сантиметров в минуту. Для каждого образца было проведено 5 циклов нанесения. После каждого цикла нанесения происходил предварительный отжиг нанесенных слоёв в течение 10 минут при 300°C. На последнем этапе, образцы помещались в печь, где нагревались со скоростью 4°C в минуту до 400°C и затем выдерживались в течение часа при постоянной температуре.

Экспериментальные методы исследования. Спектры пропускания исследуемых образцов были получены при помощи спектрометрической установки, построенной на базе монохроматора МДР41 (ЛОМО). В качестве источника излучения использовалась газоразрядная дейтериевая лампа ДДС-30, приемником излучения служил фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100.

Измерение толщин пленок и оптических констант на стеклянных подложках проводилось на спектроскопическом эллипсометре SE 800 производства SENTECH Instruments GmbH (Германия). Измерения производились в диапазоне от 280 до 850 нм при углах падения 50, 60 и 70°.

Спектральная эллипсометрия. На рис. 2 представлены зависимости эллипсометрических параметров тонких плёнок ZnO от длины волны, измеренные при угле падения 60°.

На основе эллипсометрических измерений были рассчитаны толщина, а также дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции экспериментальных образцов. Моделирование этих параметров было проведено с использованием программного обеспечения спектрального эллипсометра SENTECH SE 800 – SpectraRay3. При расчете использовалась трехслойная модель, состоящая из слоев воздуха, слоя пористого оксида цинка и полубесконечного стеклянного слоя. Пористый слой оксида цинка моделировался при помощи приближения эффективной

среды (effective medium approximation), предназначенного для описания сплошного слоя (ZnO) с небольшими включениями (воздух) [17]. При моделировании показателя преломления и коэффициента экстинкции оксида цинка использовалась модель дисперсии Тауца-Лорентца, которую можно выразить при помощи реальной ε_1 и мнимой части ε_2 диэлектрической проницаемости как:

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{AE_0C(E-E_g)}{(E^2-E_0^2)^2+C^2E^2} \cdot \frac{1}{E} & (E > E_g) \\ 0 & (E \leq E_g) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_\infty + \frac{2P}{\pi} \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_2(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi$$

где A – это сила осциллятора, E_0 – энергия полосы поглощения, C – коэффициент уширения полосы поглощения, E_g – ширина запрещенной зоны, ε_∞ – величина реальной части диэлектрической функции при высоких энергиях [18]. Рассчитанные в соответствии с этой моделью параметры тонких слоев ZnO представлены в табл. 1.

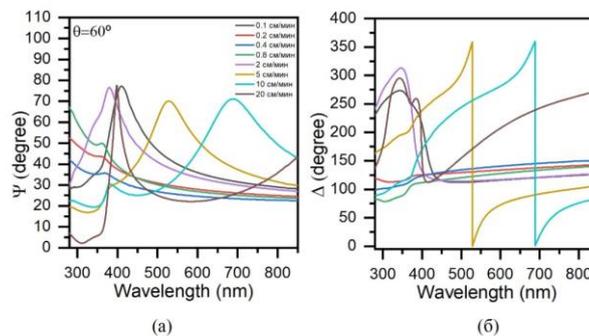


Рис 2. Спектральные зависимости эллисометрических параметров $\Psi(\lambda)$ (а) и $\Delta(\lambda)$ (б) для полученных образцов, измеренные при угле падения 60°

Таблица 1

Экспериментальные параметры тонких пленок, полученные из спектральной эллипсометрии

Скорость вытягивания, см/мин	Толщина, нм	Доля пор	ε_∞	E_g	A	E_0	C	n_{eff}
0,1	43,94	0,167	3,61	3,197	514,82	3,1039	0,1740	2,047
0,2	29,75	0,071	3,263	3,143	399,30	2,8698	0,3467	1,984
0,4	24,478	0,041	3,64	3,142	165,36	3,1071	0,5828	2,066
0,8	33,87	0,087	3,24	3,129	178,31	3,0955	0,5241	1,968
2	49,77	0,077	3,71	3,117	787,40	2,9355	0,2505	2,200
5	81,68	0,217	2,66	3,11	154,27	3,0350	0,5238	1,783
10	119,28	0,502	2,49	3,139	174,08	3,1930	0,3755	1,746
20	185,33	0,659	2,26	3,098	168,44	2,9475	0,4662	1,649

Результаты моделирования, показывающие зависимость толщины пленок ZnO от скорости вытягивания из раствора, показаны на рис. 3.

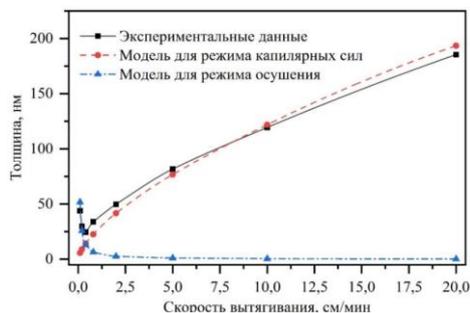


Рис. 3. Зависимость толщины пленок ZnO от скорости вытягивания из раствора

Как видно из рис. 3 в нашем случае, реализуется два режима роста тонких пленок. Аппроксимация экспериментальной кривой с модельными зависимостями, характерными для режима высушивания и режима капиллярных сил, указывает на существование двух механизмов роста для плёнок ZnO [13].

В частности режим роста капиллярных сил реализуется до скорости вытягивания равной 0,4 сантиметра в минуту, а режим высушивания (draining) от 0,4 до 20 сантиметров в минуту. Как и предсказывалось в теоретических работах, в режиме высушивания толщина пленки зависит от скорости вытягивания как $V^{3/2}$, в то время как в режиме капиллярных сил толщина оказывается обратно пропорциональна скорости [19].

Оптическая спектроскопия. Спектры пропускания образцов пленок ZnO, полученных при разных скоростях вытягивания, представлены на рис. 4.

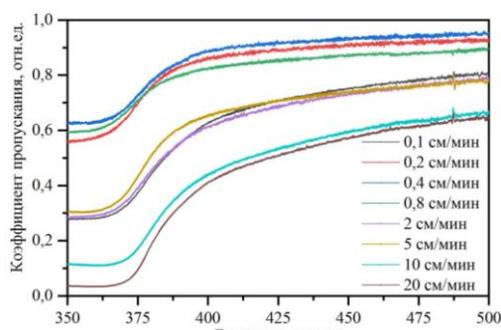


Рис. 4. Спектры пропускания тонких плёнок

Как видно из рис. 4 в области ближнего ультрафиолета у всех образцов наблюдается снижение пропускания, вероятно связанное с фундаментальным поглощением оксида цинка. Анализ этих спектров по методике Тауца позволяет оценить ширину запрещенной зоны полученных образцов [20].

Для определения величины оптической ширины запрещенной использовалась формула зависимости показателя поглощения от энергии квантов для прямозонных полупроводников:

$$\alpha(E) \cdot E = B(E - E_g)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где B – константа, E – энергия кванта света, E_g – ширина запрещенной зоны. На основе формулы (2) можно построить, так называемые графики Тауца в координатах $(\alpha(E)E)^2 = f(E)$ и экстраполяцией их линейных участков оценить величину ширины запрещенной зоны.

Для пересчета пропускания в показатель поглощения использовалась формула:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R_1(\lambda))(1-R_2(\lambda))(1-R_{12}(\lambda))}{T(\lambda)} \right] \quad (3)$$

$T(\lambda)$ – коэффициент пропускания образца. R_1 , R_{12} , R_2 – коэффициенты отражения от границ воздух-плёнка, плёнка-подложка и подложка-воздух, рассчитываемые по формулам Френеля с использованием дисперсии показателей преломления, полученных на основе эллипсометрических данных. Соответствующие графики Тауца, построенные на основании полученных в работе спектров пропускания для всех экспериментальных образцов показаны на рис. 5.

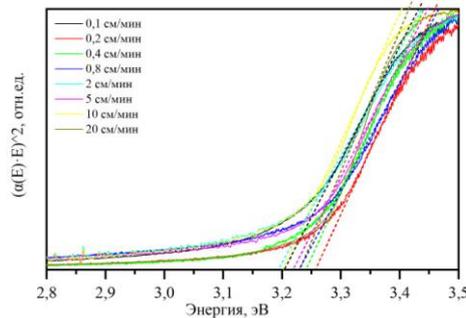


Рис. 5. Графики Тауца для тонких плёнок ZnO

Экстраполяцией линейных участков на этих графиках была проведена оценка ширины запрещенной зоны сформированных пленок ZnO, результаты которой обобщены на рис. 6.

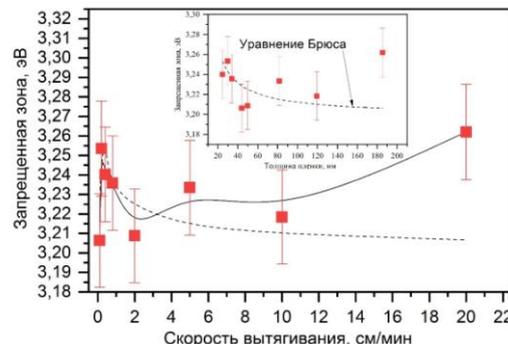


Рис. 6. Зависимость ширины запрещенной зоны от скорости вытягивания.

На вставке: зависимость ширины запрещенной зоны от толщины плёнки

Как видно из рис. 6, ширины запрещенной зоны полученных плёнок ZnO находится в сложной зависимости от скорости вытягивания. По-видимому, в области низких скоростей роста эта зависимость обусловлена в первую очередь эффектом размерного квантования, что подтверждается хорошим соответствием экспериментальных данных уравнению Брюса для образцов с малой толщиной (см. вставку на рис. 6) [21]. В то же время, отклонение от теоретической кривой для образцов с большой толщиной, т.е. полученных при высоких скоростях вытягивания, по-видимому, обусловлено изменением структуры плёнки, что подтверждается значительным увеличением её пористости [22].

Заключение. В ходе исследования было установлено, что в зависимости от скорости вытягивания реализуется два механизма роста тонких пленок ZnO на стеклянных подложках, что подтверждается характерной зависимостью толщины от скорости вытягивания. На скоростях от скорости вытягивания меньше 0,4 сантиметра в минуту осуществляется рост под действием капиллярных сил, в то время как при больших скоростях нанесения происходит рост плёнок в режиме высыхания. При исследовании оптических свойств тонких плёнок ZnO на стекле было установлена взаимосвязь толщины полученного слоя и положения края собственного поглощения, что обусловлено преимущественно влиянием квантового размерного эффекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лашкарев Г.В., Карпина В.А., Лазоренко В.И., Евтушенко А.И., Штеплюк И.И., Храновский В.Д.* Свойства оксида цинка при низких и средних температурах // Физика низких температур. – 2011. – № 37 (3). – С. 289-300.
2. *Zhang X.M., Lu M.Y., Zhang Y., Chen L.J., Wang Z.L.* Fabrication of a high-brightness blue-light-emitting diode using a ZnO-nanowire array grown on p-GaN thin film // *Adv. Mater.* – 2009. – Vol. 21, No. 27. – P. 2767-2770.
3. *Тарасов А.П.* и др. Анализ лазерной генерации тетраподов ZnO, полученных методом карботермического синтеза // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 110, № 11. – С. 750-754.
4. *Чумаков А.Н., Мухуров Н.И., Денисюк С.В., Шевченко А.А., Баран Л.В., Райченко Т.Ф., Босак Н.А.* Морфологические, оптические и фотолуминесцентные свойства тонких пленок ZnO на подложке Al₂O₃ // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 91-95.
5. *Тузовский В.К., Гаврилов С.А., Терашкевич И.М.* Солнечные элементы с пассивирующим слоем ZnO:Al, полученным методом ALD // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51, № 11. – С. 1205-1205.
6. *Лерер А.М., Тимошенко П.Е., Черникова Т.Ю.* Дисперсионные характеристики оптических волноводов на основе ZnO- наностержней // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 6. – С. 1-5.
7. *Xue F. et al.* Piezotronic effect on ZnO nanowire film based temperature sensor // *ACS applied materials & interfaces.* – 2014. – Vol. 6, No. 8. – P. 5955-5961.
8. *Soltabayev B., Mentbayeva A., Acar S.* Enhanced gas sensing properties of in doped ZnO thin films // *Materials Today: Proceedings.* – 2022. – Vol. 49. – P. 2495-2500.
9. *Xu Z. et al.* Photoconductive UV detectors based on ZnO films prepared by sol-gel method // *Journal of sol-gel science and technology.* – 2005. – Vol. 36, No. 2. – P. 223-226.
10. *Николаева Н.С., Иванов В.В., Шубин А.А.* Синтез высокодисперсных форм оксида цинка: химическое осаждение и термолиз // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 153-173.
11. *Темиров А.Т., Шаихов Д.А., Магомедов М.А.* Основные методы получения пленок ZnO // Системные технологии. – 2018. – № 3 (28). – С. 104-107.
12. *Laurenti M., Cauda V.* Porous zinc oxide thin films: Synthesis approaches and applications // *Coatings.* – 2018. – Vol. 8, No. 2. – P. 67.
13. *Ceratti D.R. et al.* A new dip coating method to obtain large-surface coatings with a minimum of solution // *Advanced Materials.* – 2015. – Vol. 27, No. 34. – P. 4958-4962.
14. *Malek M. F. et al.* Influence of various sol concentrations on stress/strain and properties of ZnO thin films synthesised by sol-gel technique // *Thin Solid Films.* – 2013. – Vol. 527. – P. 102-109.
15. *Faustini M. et al.* Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2010. – Vol. 114, No. 17. – P. 7637-7645.
16. *Ohyama M., Kouzuka H., Yoko T.* Sol-gel preparation of ZnO films with extremely preferred orientation along (002) plane from zinc acetate solution // *Thin solid films.* – 1997. – Vol. 306, No. 1. – P. 78-85.
17. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. – John Wiley & Sons, 2007. – 388 p.

18. Bouzouraa M.B. et al. Comparative study of ZnO optical dispersion laws // *Superlattices and Microstructures*. – 2017. – Vol. 104. – P. 24-36.
19. Tang X., Yan X. Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2017. – Vol. 81, No. 2. – P. 378-404.
20. Шелеманов А.А. и др. Влияние поливинилпирролидона на структуру и оптические свойства ZnO-MgO нанокompозитов, полученных полимерно-солевым методом // *Оптика и спектроскопия*. – 2021. – Т. 129, № 9. – С. 1176-1181.
21. Вакалов Д.С. и др. Эффект размерного квантования в наночастицах ZnO, полученных золь-гель методом // *Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета*. – 2012. – № 4. – С. 11-14.
22. Berger R. et al. Study on porosity in zinc oxide ultrathin films from three-step MLD Zn-hybrid polymers // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 1418.

REFERENCE

1. Lashkarev G.V., Karpina V.A., Lazorenko V.I., Evtushenko A.I., Shteplyuk I.I., Khranovskiy V.D. Svoystva oksida tsinka pri nizkikh i srednikh temperaturakh [Properties of zinc oxide at low and medium temperatures], *Fizika nizkikh temperature* [Physics of low temperatures], 2011, No. 37 (3), pp. 289-300.
2. Zhang X.M., Lu M.Y., Zhang Y., Chen L.J., Wang Z.L. Fabrication of a high-brightness blue-light-emitting diode using a ZnO-nanowire array grown on p-GaN thin film, *Adv. Mater.*, 2009, Vol. 21, No. 27, pp. 2767-2770.
3. Tarasov A.P. i dr. Analiz lazernoy generatsii tetrapodov ZnO, poluchennykh metodom karbotermicheskogo sinteza [Analysis of laser generation of ZnO tetrapods obtained by carbothermic synthesis], *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics]. – 2019. – Т. 110, № 11. – С. 750-754.
4. Chumakov A.N., Mukhurov N.I., Denisyuk S.V., Shevchenok A.A., Baran L.V., Raychenok T.F., Bosak N.A. Morfologicheskie, opticheskie i fotolyuminescentnyye svoystva tonkikh plenok ZnO na podlozhke Al₂O₃ [Analysis of laser generation of ZnO tetrapods obtained by carbothermic synthesis], *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2018, Vol. 54, No. 3, pp. 91-95.
5. Tuzovskiy V.K., Gavrilov S.A., Terashkevich I.M. Solnechnyye elementy s passiviruyushchim sloem ZnO:Al, poluchennym metodom ALD [Solar cells with a ZnO:Al passivating layer obtained by the ALD method], *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 2015, Vol. 51, No. 11, pp. 1205-1205.
6. Lerer A.M., Timoshenko P.E., Chernikova T.Yu. Dispersionnyye kharakteristiki opticheskikh volnovodov na osnove ZnO- nanosterzhney [Dispersion characteristics of optical waveguides based on ZnO-nanorods], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 6, pp. 1-5.
7. Xue F. et al. Piezotronic effect on ZnO nanowire film based temperature sensor, *ACS applied materials & interfaces*, 2014, Vol. 6, No. 8, pp. 5955-5961.
8. Soltabayev B., Mentbayeva A., Acar S. Enhanced gas sensing properties of in doped ZnO thin films, *Materials Today: Proceedings*, 2022, Vol. 49, pp. 2495-2500.
9. Xu Z. et al. Photoconductive UV detectors based on ZnO films prepared by sol-gel method, *Journal of sol-gel science and technology*, 2005, Vol. 36, No. 2, pp. 223-226.
10. Nikolaeva N.S., Ivanov V.V., Shubin A.A. Sintez vysokodispersnykh form oksida tsinka: khimicheskoe osazhdenie i termoliz [Synthesis of highly dispersed forms of zinc oxide: chemical precipitation and thermolysis], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry], 2010, Vol. 3, No. 2, pp. 153-173.
11. Temirov A.T., Shaikhov D.A., Magomedov M.A. Osnovnyye metody polucheniya plenok ZnO [Basic methods of obtaining ZnO films], *Sistemnyye tekhnologii* [System technologies], 2018, No. 3 (28), pp. 104-107.
12. Laurenti M., Cauda V. Porous zinc oxide thin films: Synthesis approaches and applications, *Coatings*, 2018, Vol. 8, No. 2, pp. 67.
13. Ceratti D.R. et al. A new dip coating method to obtain large-surface coatings with a minimum of solution, *Advanced Materials*, 2015, Vol. 27, No. 34, pp. 4958-4962.
14. Malek M.F. et al. Influence of various sol concentrations on stress/strain and properties of ZnO thin films synthesised by sol-gel technique, *Thin Solid Films*, 2013, Vol. 527, pp. 102-109.

15. *Faustini M.* et al. Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, Vol. 114, No. 17, pp. 7637-7645.
16. *Ohyama M., Kouzuka H., Yoko T.* Sol-gel preparation of ZnO films with extremely preferred orientation along (002) plane from zinc acetate solution, *Thin solid films*, 1997, Vol. 306, No. 1, pp. 78-85.
17. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. John Wiley & Sons, 2007, 388 p.
18. *Bouzouraa M.B.* et al. Comparative study of ZnO optical dispersion laws, *Superlattices and Microstructures*, 2017, Vol. 104, pp. 24-36.
19. *Tang X., Yan X.* Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 378-404.
20. *Shelemanov A.A. i dr.* Vliyanie polivinilpirrolidona na strukturu i opticheskie svoystva ZnO-MgO nanokompozitov, poluchennykh polimerno-solevym metodom [The effect of polyvinylpyrrolidone on the structure and optical properties of ZnO-MgO nanocomposites obtained by the polymer-salt method], *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2021, Vol. 129, No. 9, pp. 1176-1181.
21. *Vakalov D.S. i dr.* Effekt razmernogo kvantovaniya v nanochastitsakh ZnO, poluchennykh zol'-gel' metodom [The effect of dimensional quantization in ZnO nanoparticles obtained by sol-gel method], *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasus State Technical University], 2012, No. 4, pp. 11-14.
22. *Berger R.* et al. Study on porosity in zinc oxide ultrathin films from three-step MLD Zn-hybrid polymers, *Materials*, 2021, Vol. 14, No. 6, pp. 1418.

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

Марьина Ульяна Андреевна – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: ulyana-ne@mail.ru; г. Ставрополь, Россия; тел.: 89197368305; кафедра инфокоммуникаций-С; к.т.н.; доцент.

Газдинский Денис Леонидович – e-mail: tenden116@yandex.ru; кафедра инфокоммуникаций; аспирант.

Чапура Олег Михайлович – e-mail: ochapura@ncfu.ru; ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории технологии тонких плёнок и наногетероструктур научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета.

Михнев Леонид Васильевич – e-mail: lmikhnev@ncfu.ru; кафедра инфокоммуникаций; д.ф.-м.н.; профессор.

Бондаренко Евгений Алексеевич – e-mail: evabondarenko@ncfu.ru; кафедра инфокоммуникаций; к.ф.-м.н.; доцент.

Пигулев Роман Витальевич – e-mail: pigulev_r.v@mail.ru; кафедра инфокоммуникаций; к.т.н.; доцент.

Maryina Uliana Andreevna – North-Caucasus Federal University; e-mail: ulyana-ne@mail.ru; Stavropol', Russia; phone: +79197368305; the department of infocommunications-S; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gazdinsky Denis Leonidovich – e-mail: tenden116@yandex.ru; the department of infocommunications; postgraduate student.

Chapura Oleg Mikhailovich – e-mail: ochapura@ncfu.ru; Lead engineer of the Research Laboratory of Thin Films and Nanoheterostructures Technology of Research and Laboratory Complex of Clean Zones Faculty of Physics and Technology.

Mikhnev Leonid Vasilevich – e-mail: lmikhnev@ncfu.ru; the department of infocommunications; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Bondarenko Evgeny Alekseevich – e-mail: evabondarenko@ncfu.ru; the department of infocommunications; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Pigulev Roman Vitalievich – e-mail: pigulev_r.v@mail.ru; the department of infocommunications; cand. of eng. sc.; associate professor.

Р.Н. Набиев, Г.И. Гараев, Р.Р. Рустамов**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЕМКОСТНОЕ УСТРОЙСТВО С ДВУМЯ
АВТОГЕНЕРАТОРАМИ**

Описаны структура, конструкция, установка, функциональные возможности, технические параметры емкостного устройства, применяемого в системах охраны и оповещения периметров объектов, а также схема запатентованного дифференциально-емкостного датчика с двумя автогенераторами, который является частью устройства, по результатам расчета оценивается вероятность обнаружения несанкционированных вторжений с использованием этого устройства. Принцип работы емкостного датчика заключается в преобразовании изменения емкости относительно Земли двух чувствительных элементов, составляющих защитное ограждение, при приближении или прикосновении к ним посторонних лиц в изменение частоты с помощью автогенераторов, а принцип работы емкостного устройства основан на срабатывании сигнализации при превышении установленного предельного значения разности частот генераторов. Показано преимущество схем автогенераторов, построенных на логических элементах в дифференциально-емкостном датчике, к входам которых подключены чувствительные элементы, причем один из них используется как сигнальный, а другой как опорный генератор. Показано, что схемы автогенераторов, построенных на цифровых микросхемах по той же схеме, значительно упрощаются, когда в качестве частотоподающих не используются RLC-элементы с сосредоточенными параметрами и кварцевые резонаторы, а их адаптация к изменениям внешней среды происходит автоматически. Чтобы передать высокочастотные сигналы генераторов на ноутбук, сначала эти сигналы преобразуются в низкочастотные сигналы через делители частоты, которые находятся в частотомерах, затем эти низкочастотные сигналы преобразуются в цифровые сигналы с помощью модуля Arduino Uno. Программное обеспечение, написанное на ноутбуке, вычисляет разницу частот и генерирует сигнал тревоги при определенном значении разности. На основании расчетов отмечена достаточно высокая вероятность обнаружения несанкционированных вторжений на объекты и эффективность использования устройства охраны и оповещения с дифференциально-емкостным датчиком на основе двух автогенераторов в системе авиационной безопасности.

Гражданская авиация; авиационная безопасность; охранно-оповестительная система; дифференциально-емкостной датчик; автогенератор; логический элемент; чувствительный элемент; телефонный полевой кабель.

R.N. Nabiyev, G.I. Garayev, R.R. Rustamov**DIFFERENTIAL-CAPACITORY DEVICE WITH TWO AUTOGENERATORS**

The article describes the structure, design, installation, functionality, technical parameters of a capacitive device used in security and warning systems for the perimeters of objects, as well as a circuit of a patented differential-capacitive sensor with two autogenerators, which is part of the device, the probability of detecting unauthorized intrusions is calculated and estimated using the device. The operation of the capacitive sensor is found in the transformations of the change in the capacitance of two sensitive elements relative to the Earth, the possibility of a protective fence, the change in frequency using autogenerators when approaching or touching them on external faces, and the principle of operation of the capacitive device is based on detecting detection when the frequency difference of the autogenerators exceeds the set limit value. The advantage of autogenerators circuits built on logic elements in a differential capacitive sensor is shown, to the inputs of which sensitive elements are connected, one of which is used as a signal, and the other as a reference generator. It is shown that when RLC-elements with lumped parameters and quartz resonators are not used as frequency counters, the circuits of self-oscillators built on digital microcircuits according to the same scheme and their adaptation to changes in the external environment are greatly simplified. happens automatically. To transfer the high frequency signals of the generators to the laptop, first these signals are converted into low frequency signals through

frequency dividers, which are in the frequency counters, then these low frequency signals are converted into digital signals using the Arduino Uno module. The software written on the laptop calculates the frequency difference and generates an alarm at a certain value of the difference. According to the calculations, a rather high probability of detecting unauthorized intrusions on objects and the efficiency of using a security warning device with a differential capacitive sensor based on two self-oscillators in the aviation security system were noted.

Civil aviation; aviation security; security-warning system; differential capacitance sensor; autogenerator; logic element; sensitive element; telephone field cable.

Введение. В настоящее время в гражданской авиации охрана периметра объектов, которая считается превентивной мерой по обеспечению авиационной безопасности, осуществляется в основном с помощью автоматизированных и интегрированных систем охраны и оповещения [1–3]. Оптимальная интеграция нескольких контуров управления в системы охраны и оповещения позволяет разработать эффективный комплекс безопасности [4–7]. Одним из широкоспектрных контуров управления является емкостное устройство с дифференциально-емкостным датчиком, обычно отличающееся долговечностью и надежностью [8–12].

Цель статьи – определить особенности создания и установки охранного устройства с дифференциально-емкостным датчиком с двумя автогенераторами, собранными на цифровых логических элементах, для систем охраны и оповещения периметра.

Задачи исследования. *Емкостное устройство* состоит из двух автогенераторов (АГ1, АГ2), на вход каждого из которых отдельно включены чувствительные элементы (ЧЭ1, ЧЭ2); двух частотомеров (ЧМ1, ЧМ2); двух контроллеров; аккумулятора (АБ) и ноутбука (рис. 1).

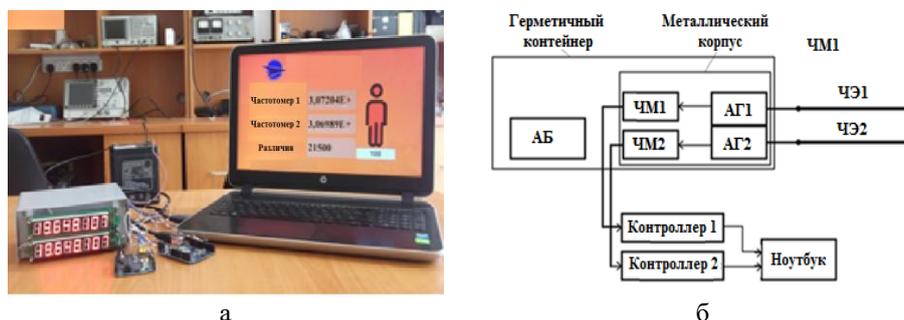


Рис. 1. Устройство емкости: а – общий вид, б – структурная схема

Два автогенератора, к входам которых подключены ЧЭ и один из которых используется как измерительный, а другой как опорный генератор, вместе составляют измерительный преобразователь, преобразующий изменение емкости в изменение частоты. Поскольку разность частот выходных сигналов сравнивается с некоторой величиной, преобразователь в статье назван дифференциальным емкостным датчиком.

В качестве чувствительного элемента используется полевой телефонный кабель марки П-274М. Этот кабель имеет ниже описанные конструктивно-технические характеристики [13]:

- ◆ кабель состоит из двух витых проводов, каждый провод изготовлен из четырех медных и трех оцинкованных стальных проволок, покрытых общим изоляционным материалом, при этом стальные проволоки предназначены для обеспечения прочности медных проводов на разрыв;
- ◆ изоляция рассчитана на сильные деформационные или разрывные нагрузки;

◆ поскольку диаметр проволок небольшой, то и провода, и кабель достаточно эластичны.

Кабель предназначен для маломощных нагрузок в сетях постоянного или переменного тока, с напряжением 120 В или 230 В соответственно. Его можно применить вдоль опор электропередачи на всех типах земельных участков или в короткие сроки, на водных участках.

Указанные особенности позволяют использовать полевой телефонный кабель марки П-274М в качестве чувствительного элемента на участках с различным рельефом, оперативно выполнять монтажные работы по периметру на больших площадях и устанавливать высоконадежный, более эффективный контур управления.

Автогенератор. В датчике дифференциальной емкости в качестве измерительного преобразователя для получения сигналов и эталонных частот использовались два автогенератора, каждый из которых был построен на трех логических элементах [14]. Автогенераторы собраны на двух цифровых микросхемах *K155ЛА3*, внутри которых расположены четыре логических элемента «И-НЕ». Эта микросхема является базовым элементом цифровых интегральных микросхем серии *K155*. Логические элементы внутри микросхемы соединяются только линией электропитания: положительный и отрицательный полюса напряжения питания применяются, соответственно на 14-ый и 7-ой выводы микросхемы. Выводы, на которые подается напряжение питания цифровых микросхем, в принципиальных схемах, обычно не показываются.

При использовании аналогов упомянутой микросхемы, например, микросхемы 7400, различия в выходных частотах автогенераторов не меняют принцип работы датчика дифференциальной емкости.

Частоты обоих автогенераторов, в зависимости от изменения напряжения аккумуляторной батареи, а также окружающей среды меняются. При этом, при отсутствии приближения к чувствительным элементам, для значительного уменьшения или предотвращения возникновения ложных срабатываний, разность частот автогенераторов должна оставаться максимально постоянной или не выходить за заданное предельное значение. Для удовлетворения этого требования к разности частот, геометрические размеры чувствительных элементов принимались равными и логические элементы, расположенные внутри каждой микросхемы, распределялись в схемах автогенераторов симметрично перекрестно [15, 16].

Симметричное перекрестное распределение логических элементов в схемах автогенераторов выполняется следующим образом:

◆ логические элементы DD1.1, DD1.2 из четырех логических элементов «И-НЕ», расположенных внутри цифровой микросхемы, подключаются к схеме первого, а логические элементы DD1.3, DD1.4. к схеме второго автогенератора. Логические элементы DD2.1, DD2.2 из четырех логических элементов «И-НЕ», расположенных внутри второй цифровой микросхемы, подключаются к первой, а логические элементы DD2.3, DD2.4 ко второй схеме автогенератора (рис. 2). Для создания обратной связи входы и выходы автогенераторов подключаются непосредственно: выход DD2.1 в 1-ом автогенераторе соединен со входом DD1.1, а выход DD2.3 во 2-ом автогенераторе со входом DD1.3.

В таком соединении элементы RLC в цепях обратной связи не используются, а микросхемы работают на верхнем пределе частоты. Для устранения влияния на работу автогенераторов внешних цепей, к их выходам в качестве защитного (буферного) каскада подключаются логические элементы DD2, 2 и DD2, 4 соответственно.

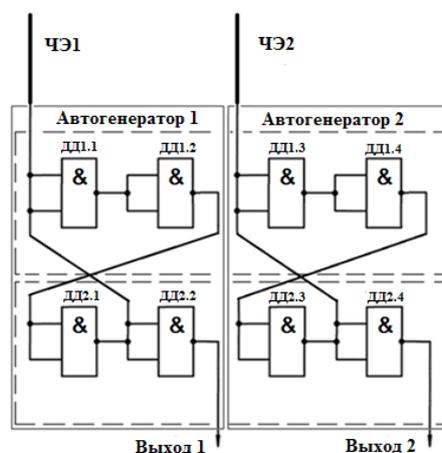


Рис. 2. Схема двух автогенераторов, к которым подключены датчики

Частотомер. В датчике дифференциальной емкости были использованы, в виде полуфабрикатов китайского производства, два частотомера коммерческого назначения. С техническими параметрами и принципом работы цифровых устройств с модельным номером “SKU00653” можно ознакомиться в интернете.

Измерительный тракт частотомера можно разделить на две части. В первой части используется делитель частоты, во второй - микроконтроллер. Сигнал согласуется с входом микроконтроллера с помощью делителя частоты с коэффициентом 64. Исходя из этого, микроконтроллер выполняет расчет фактического значения измеряемой частоты.

Наличие в составе частотного делителя, в дополнение к визуальному контролю частотных характеристик автогенераторов, привело к полезному, упомянутого ниже, применению частотомеров на двух автогенераторных датчиках дифференциальной емкости.

Низкочастотный сигнал с выхода делителя частоты подается на контроллер для передачи на ноутбук. Таким образом, выполнение обработки низкочастотного сигнала через модуль Arduino Uno, реализованный в качестве контроллера, становится возможным без необходимости в дополнительном устройстве.

Конструкция. Печатная плата, на которой собраны автогенераторы, размещена внутри металлического корпуса. Для повышения устойчивости датчика дифференциальной емкости к электромагнитным помехам, металлический корпус изготовлен из металла с магнитными свойствами толщиной 1 мм. Восьмизначные частотомеры, расположены на передней панели корпуса, а разъемы расположены на задней стенке металлического корпуса. Разъемы предназначены для подключения аккумуляторной батареи и чувствительных элементов к частотомерам и датчику дифференциальной емкости.

Создание охраняемого рубежа. Принцип работы датчика дифференциальной емкости основан на изменении емкости относительно Земли двух чувствительных элементов, образующих охранное ограждение при приближении. ЧЭ-и, образующие линии охранного ограждения, устанавливаются параллельно друг другу и к поверхности Земли (рис. 3) [17, 18].

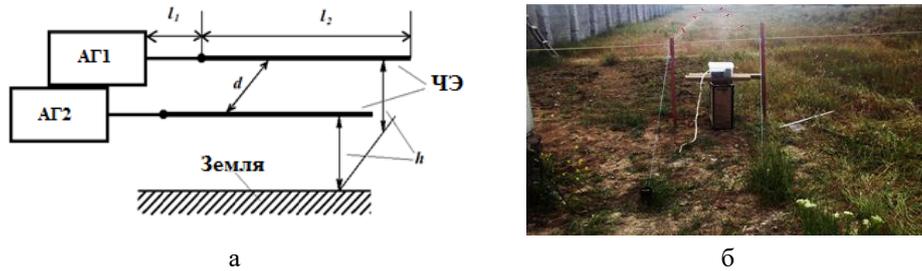


Рис. 3. Чувствительные элементы индикатора дифференциальной емкости: а – схема расположения, б – вид устройства на местности.

Следует отметить, что если чувствительные элементы монтировать по прямой, направленной параллельно поверхности Земли в противоположных направлениях, то вероятность возникновения сигнала “тревоги” значительно снижается за счет того, что разность частот равна нулю или имеет очень небольшую величину, когда к каждому из них, одновременно приближается равное количество людей одинакового веса (нарушителей). Но вероятность того, что такое событие произойдет в реальной жизни, очень мала.

Для подключения ЧЭ к автогенераторам использовался коаксиальный кабель. На рис. 3, l_1 – длина соединительного провода или коаксиального кабеля, используемого для подключения ЧЭ к автогенератору, l_2 – длина ЧЭ, d – расстояние между ЧЭ, h – высота ЧЭ от поверхности Земли. В качестве соединительного провода использовался полевой телефонный кабель, в качестве коаксиального кабеля – кабель марки РК75-4-11 с волновым сопротивлением 75 Ом, причем длины обоих кабелей выбраны $l_1 = 1$ м.

Контроллер. Для передачи выходных сигналов автогенераторов на ноутбук используются два модуля Arduino Uno, и частоты сигналов автогенераторов обрабатываются в ноутбуке посредством программы Unity, сравниваются значения частоты и разница между ними выводится на монитор. При превышении от заданного значения разницы создается тревога. Блок-схемы алгоритмов и исходные коды программ, написанных на модулях Arduino Uno и ноутбуке приведены, соответственно в [19–20].

Вероятность обнаружения нарушителя. Вероятность обнаружения незаконных помет, которые могут возникнуть в каждом из четырех зон ($N_3 = 4$) периметра объекта метеорологического радиолокатора с помощью устройства охраны с индикатором дифференциальной емкости ($N_{пер.тех}$) была рассчитана на основе статьи [21]. Из-за того, что зависимость пропускной способности этого устройства охраны от степени ясности воздуха не выражена заметно ($\lambda = 1$), при расчетах учитывалась только зависимость от годовых климатических условий ($w = 0,7$). Для этого, принимая во внимание длину периметра объекта - $l_{пер.} = 200$ м; длину устойчивой и надежной зоны идентификации - $l_{з.уст} = 500$ м; вероятность обнаружения нарушителя в зоне наблюдения $P_{з.пер.} = 0,950$ -; коэффициент увеличения плотности технических средств в зоне $\alpha_{тех.з} = 2,57$ -; количество опасных объектов, расположенных в пределах зоны $\nu = 2$ (электролиния и объект навигации) и было определено количество технических средств на каждую зону периметра - $N_{з1.тех}$, а также коэффициент, зависящий от технических характеристик устройства охраны - $\gamma_{тех}$.

$$N_{з1.тех} = N_3 \cdot \frac{N_{пер.тех}}{\left(\frac{l_{пер.}}{l_{з.уст}} - (1 - \alpha_{тех.з})\nu\right)} \approx 1,13.$$

$$\gamma_{тех} = \frac{P_{з.пер.}}{(l_{з.уст})^2} = 237500 .$$

После установления значений $N_{з1.тех} \approx 1,13$ и $\gamma_{тех} = 237500$ были рассчитаны вероятности обнаружения нарушителя в идеальных ($\lambda = 1$ и $w = 1$) и годовых климатических ($\lambda = 1$ и $w = 0,7$) условиях в опасных зонах ($P_{ид.об}$ и $P_{усл.об}$) в:

при $\lambda = 1$ и $w = 1$:

$$P_{ид.об} = 1 - \left(1 - \frac{\gamma_{тех} \cdot \lambda \cdot w}{1 + (l_{з1.тех})^2}\right)^{\alpha_{тех.з} \cdot N_{з1.тех}} \approx 0,999,$$

а) при $\lambda = 1$ и $w = 0,7$:

$$P_{усл.об} = 1 - \left(1 - \frac{\gamma_{тех} \cdot \lambda \cdot w}{1 + (l_{з1.тех})^2}\right)^{\alpha_{тех.з} \cdot N_{з1.тех}} \approx 0,958 .$$

Как видно, вероятность обнаружения незаконных вторжений, которые могут происходить на территории объектов, расположенных в охраняемой зоне в идеальных и годовых климатических условиях (дождь, снег, пыль, туман и т. д.), соответственно, равны $P_{ид.об} \approx 0,999$ и $P_{усл.об} \approx 0,958$.

Функциональные возможности и технические параметры датчика дифференциальной емкости. Сигнал тревоги срабатывает при приближении посторонних лиц к одному из чувствительных элементов на определенное расстояние или прикосновении к нему, когда чувствительный элемент срезан или если его открытая от изоляции часть касается земли. Гарантированное расстояние чувствительности для безопасного срабатывания сигнализации при приближении одного человека составляет менее 3 м.

В таблице приведены технические параметры датчика дифференциальной емкости с двумя автогенераторами.

Таблица

Общие технические параметры датчика дифференциальной емкости с двумя автогенераторами

Параметры	Значение
Напряжение питания, V	9-12
Диапазон рабочих частот автогенераторов без чувствительных элементов (варьируется в зависимости от марки и модели микросхемы), МГц	16-17
Максимальная длина защитного забора, м	500
Безопасное расстояние чувствительности, м	2,5-3
Потребляемый ток, не более мА	100
Время готовности устройства к работе, после подачи напряжения питания: сек	60
Время готовности агрегата после пуска, не более секунд	30
Возможность обнаружения:	
а) в идеальных климатических условиях	0,999
б) в годовых климатических условиях	0,958
Режим работы:	день и ночь

Таким образом, в двух автогенераторных схемах датчиков дифференциальной емкости, предназначенных для системы охраны и оповещения, в качестве частото задающего элемента не используются активные и реактивные элементы (RLC) с сосредоточенными параметрами, а также другие полупроводниковые устройства для настройки частоты. При этом, получают следующие преимущества:

- ◆ система работает с максимальной точностью;
- ◆ исключаются высокие требования к параметрам элементов RLC и устройств с сосредоточенными параметрами и зависимость частоты от эффекта старения, присущее конденсаторам, схема упрощается, повышается ее надежность.

Заключение. Использование двух идентичных сигнальных автогенераторов на датчике дифференциальной емкости позволяет осуществлять автоматическую адаптацию устройства охраны к изменениям окружающей среды без использования кварцевого резонатора на эталонном генераторе. Автогенераторы целесообразно строить на цифровых микросхемах, с целью упрощения их схем без использования элементов с сосредоточенными параметрами в качестве частото задающего. Симметричное перекрестное распределение пар логических элементов, расположенных внутри микросхемы, в схеме обоих автогенераторов обеспечивает одинаковое изменение их характеристик. При этом, возможно использование одной, двух или трех цифровых микросхем, а также аналоговых микросхем в зависимости от количества логических элементов, находящихся в них. Тот факт, что при использовании различных типов микросхем генерируемые выходные частоты датчика дифференциальной емкости отличаются, это не меняет принцип работы емкостного устройства.

Достаточно высокая вероятность обнаружения возможных вторжений, которые могут возникнуть на объектах ($P_{ид.об} \approx 0,999$ и $P_{усл.об} \approx 0,958$), определяет эффективность использования устройства охраны с двух автогенераторным датчиком дифференциальной емкости в системе авиационной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Preventive security measures // Annex 17 to the Convention on International Civil Aviation. Security. Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference. – 2020. – No. 11. Chapter 4. – P. 25-29.
2. Priority outcomes // ICAO. Global aviation security plan. – November 2017. – Chapter 3. – P. 11.
3. Пашаев А.М., Набиев Р.Н., Нагиев Н.Т., Велиева Г.Д., Рустамов Р.Р. Особенности проектирования автоматизированного дистанционного охранного комплекса // Вопросы безопасности. – 2018. – № 1. – С. 32-51.
4. Пашаев А.М., Набиев Р.Н., Велиева Г.Д. Дистанционная система безопасности взлетно-посадочной полосы Международного Нахичеванского Аэропорта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 249-255.
5. Rüstəmov R.R. Məsafədən idarə edilən inteqrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi imkanları // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri. – 2019, 21 No. 4. – Səh. 31-39.
6. Набиев Р.Н., Рамазанов К.Ш., Рустамов Р.Р. Оценка эффективности применения автоматизированной охранно-оповестительной системы // Тенденции развития науки и образования. – Июнь 2019. – № 51. – Ч. 7. – С. 21-24.
7. Rüstəmov R.R. İnteqrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi perspektivləri // Azərbaycan Milli Aerokosmik Agentliyinin Xəbərləri. – 2020. – № 3 (23). – Səh. 47-53.
8. Набиев Р.Н., Гараев Г.И., Рустамов Р.Р. Сравнительный анализ электрических схем ёмкостных датчиков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3 (188). – С. 51-64.
9. Галков А., Хомутов О., Якунин А. Емкостная адаптивная охранная система. Патент РФ № 2297671 (С2), с приоритетом от 23. 06. 2005 г. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели». – 2007. – № 11.
10. Paşayev A.M., Nəbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R. Avtomatlaşdırılmış mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin etibarlılığının qiymətləndirilməsi // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri. – 2018. – № 2. – Səh. 11-27.
11. Кузин С.А., Львов П.А., Львов А.А., Светлов М.С. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3 (188). – С. 29-41.
12. Производитель и разработчик: компания ПИТБУЛЬ, г. Одесса Издание 0.9 beta (краткая, для ознакомления). – 30 с.
13. Провода П274М | П274МЛ с полиэтиленовой изоляционно-защитной оболочкой. – https://www.radiodetali.perm.ru/list/Provod_P274M.pdf [daxil olma 27.04.2022].
14. Генераторы на микросхемах ТТЛ. <http://esxema.ru/?p=1084> [daxil olma 27.04.2022].
15. Nəbiyev R.N., Garaev G.I., Rüstəmov R.R. Determination of high sensitive auto-generator scheme for capacity sensors // International Gobeklitepe Applied Sciences Congress-II. Harran University, Sanliurfa, Turkey, May 6-8, 2021. – P. 126-133.

16. *Нәбиев Р.Н., Гараев Г.И., Рустамов Р.Р.* Исследование схем автогенераторов для емкостных датчиков // Наука России: Цели и задачи: Сб. научных трудов по материалам XV международной научной конференции, Екатеринбург, 10 июня 2019 г. – Ч. 1. – С. 51-53.
17. *Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R.* The study of dependence of the resonance frequencies of differential sensor on the intruder's approaching // Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology. Warsaw, Poland, April 30, 2021. – P. 3-8.
18. *Nәbiyev R.N., Qarayev Q.İ., Rüstəmov R.R.* Məntiq elementlərində qurulmuş həssas elementli iki avtoqeneratorun rezonans tezliklərinin tədqiqi // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri. – 2019. – 21 № 3. – Səh. 19-31.
19. *Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R., Guluzade H.S.* Software development differential capacitance device with two auto generators // International Gobeklitepe Applied Sciences Congress-II. Harran University, Sanliurfa, Turkey, May 6-8, 2021. – P. 134-140.
20. *Пономаренко В.И., Караваев А.С.* Использование платформы Arduino в измерениях и физическом эксперименте // Известия Вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2014. – № 4. – С. 77-90.
21. *Nәbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R.* Təkmilləşdirilmiş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin riyazi modelinin qurulması // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri. – 2019. – № 1 (21). – S. 132-140.

REFERENCES

1. Preventive security measures, *Annex 17 to the Convention on International Civil Aviation. Security. Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference*, 2020, No. 11. Chapter 4, pp. 25-29;
2. Priority outcomes, *ICAO. Global aviation security plan*, November 2017, Chapter 3, pp. 11.
3. *Pashaev A.M., Nabiev R.N., Nagiev N.T., Velieva G.D., Rustamov R.R.* Osobennosti proektirovaniya avtomatizirovannogo distantsionnogo okhrannogo kompleksa [Design features of the automated remote protection complex], *Voprosy bezopasnosti* [Security issues], 2018, No. 1, pp. 32-51;
4. *Pashaev A.M., Nabiev R.N., Velieva G.D.* Distantsionnaya sistema bezopasnosti vzletno-posadochnoy polosy Mezhdunarodnogo Nakhchivanskogo Aeroporta [Remote security system of the runway of Nakhchivan International Airport], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 2, pp. 249-255.
5. *Rüstəmov R.R.* Məsafədən idarə edilən inteqrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi imkanları [Possibilities of application of remote-controlled integrated security-warning system], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri* [Scientific Collections of the National Aviation Academy], 2019, 21 No. 4, pp. 31-39.
6. *Nabiev R.N., Ramazanov K.Sh., Rustamov R.R.* Otsenka effektivnosti primeneniya avtomatizirovannoy okhranno-opovestitel'noy sistemy [Evaluation of the effectiveness of the automated security and notification system], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], June 2019, No. 51, Part 7, pp. 21-24.
7. *Rüstəmov R.R.* İnteqrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi perspektivləri, *Azərbaycan Milli Aerokosmik Agentliyinin Xəbərləri*, 2020, No. 3 (23), pp. 47-53.
8. *Nabiev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R.* Sravnitel'nyy analiz elektricheskikh skhem emkostnykh datchikov [Comparative analysis of electrical circuits of capacitive sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 51-64.
9. *Galkov A., Khomutov O., Yakunin A.* Emkostnaya adaptivnaya okhrannaya sistema. Patent RF № 2297671 (S2), s prioritom ot 23. 06. 2005 g. Byulleten' «Izobreteniya. Poleznye modeli» [Capacitive adaptive security system. RF Patent No. 2297671 (C2), with priority dated 23. 06. 2005 Bulletin "Inventions. Utility models"], 2007, No. 11.
10. *Paşayev A.M., Nәbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R.* Avtomatlaşdırılmış mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin etibarlılığının qiymətləndirilməsi [Assessment of the reliability of the automated protection-warning system], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri* [Scientific Works of the National Aviation Academy], 2018, No. 2, Səh. 11-27.

11. Kuzin S.A., L'vov P.A., L'vov A.A., Svetlov M.S. Povyshenie tochnosti emkostnykh datchikov davleniya dlya aviakosmicheskoy tekhniki [Improving the accuracy of capacitive pressure sensors for aerospace equipment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 29-41.
12. Proizvoditel' i razrabotchik: kompaniya PITBUL', g. Odessa Izdanie 0.9 beta (kratkaya, dlya oznakomleniya) [Manufacturer and developer: PITBULL company, Odessa 0.9 beta edition (brief, for reference)], 30 p.
13. Provoda P274M | P274ML s polietilenovoy izolyatsionno-zashchitnoy obolochkoy [Wires P274M | P274ML with a polyethylene insulating and protective shell]. Available at: https://www.radiodetali.perm.ru/list/Provod_P274M.pdf (accessed 27 April 2022).
14. Generatory na miroskhemakh TTL [Generators on TTL circuits]. Available at: <http://esxema.ru/?p=1084> (accessed 27 April 2022).
15. Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R. Determination of high sensitive auto-generator scheme for capacity sensors, *International Gobeklitepe Applied Sciences Congress-II. Harran University, Sanliurfa, Turkey, May 6-8, 2021*, pp. 126-133.
16. Nabiev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R. Issledovanie skhem avtogeneratorov dlya emkostnykh datchikov [Kapasitif sensorlar üçün avtomatik generatorlar sxemlərinin tədqiqi], Nauka Rossii: Tseli i zadachi: Sb. nauchnykh trudov po materialam XV mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Ekaterinburg, 10 iyunya 2019 g. [Rusiya elmi: məqsədlər və məqsədlər: XV Beynəlxalq elmi konfransın materialları üzrə Elmi əsərlər Sat, Yekaterinburq, 10 iyun 2019], Part 1, pp. 51-53.
17. Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R. The study of dependence of the resonance frequencies of differential sensor on the intruder's approaching, *Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology. Warsaw, Poland, April 30, 2021*, pp. 3-8.
18. Nəbiyev R.N., Qarayev Q.İ., Rüstəmov R.R. Məntiq elementlərində qurulmuş həssas elementli iki avtogeneratorun rezonans tezliklərinin tədqiqi [The study of resonant frequencies of two sensitive elements autogenerator constructed in logic elements], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri* [Scientific Collections of the National Aviation Academy], 2019, 21 No. 3, pp. 19-31.
19. Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R., Guluzade H.S. Software development differential capacitance device with two auto generators, *International Gobeklitepe Applied Sciences Congress-II. Harran University, Sanliurfa, Turkey, May 6-8, 2021*, pp. 134-140.
20. Ponomarenko V.I., Karavaev A.S. Ispol'zovanie platformy Arduino v izmereniyakh i fizicheskoy eksperimente [The use of the Arduino platform in measurements and physical experiment], *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika* [Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics], 2014, No. 4, pp. 77-90.
21. Nəbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R. Təkmilləşdirilmiş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin riyazi modelinin qurulması [Development of mathematical model of improved security-warning system], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri* [Scientific Journals of the National Aviation Academy], 2019, No. 1 (21), pp. 132-140.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ф.Г. Агаев.

Набиев Расим Насиб оглы – Национальная авиационная академия Азербайджана; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; г. Баку, Азербайджан; тел.: +994557547646; НИИ Транспорта и авиакосмических проблем; начальник отдела авиационной электроники; д.т.н.

Гараев Гадир Исахан оглы – e-mail: qedir71@mail.ru; тел.: +994703218115; инженер электроники.

Рустамов Руслан Рустам оглы – e-mail: ruslan__433@mail.ru; тел.: +994705864616; докторант.

Nabiyev Rasim Nasib oglu – National Aviation Academy of Azerbaijan; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; Baku, Azerbaijan; phone: +994557547646; the department of the Scientific Research Institute of Transport and Aerospace Problems; head of Aviation Electronic, dr. of eng.sc.

Garaev Gadir Isahan oglu – e-mail: qedir71@mail.ru; phone: +994703218115; electronics engineer.

Rustamov Ruslan Rustam oglu – e-mail: ruslan__433@mail.ru; phone: +994705864616; the person working for doctor's degree.

Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов

ШИРОКОПОЛОСНОЕ ДОУ НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Наиболее известной диаграммообразующим устройством (ДОУ) (для линейных и плоских МАР) является линза Ротмана, большой интерес к которой вызван тем, что она позволяет формировать веер лучей МАР в широком пространственном секторе углов (широкоугольное сканирование), имеет довольно высокий КПД и МАР с линзой Ротмана имеет низкий уровень боковых лепестков. Другим достоинством МАР с линзой Ротмана является слабая зависимость положения лучей в пространстве от частоты, в отличие от МАР с матричной ДОУ Батлера, у которой при высоком КПД (теоретически 100%) положение лучей зависит от частоты. Однако разработанные ранее аналоги линзы Ротмана, имеют большие размеры, требуют в конструкции дополнительные составные части, что влияет на коэффициент передачи линзы в рабочем диапазоне частот от 2 ГГц до 20 ГГц и на согласованность устройства с другими узлами приемопередающей аппаратуры. Отсюда следует, что исследование и модернизация линзовых структур, применительно к многолучевым антенным решеткам (МАР) является актуальной темой для исследования. Цель работы предложить методику расчета линзы Ротмана, модернизировать конструкцию линзы, изготовить макет линзы и провести экспериментальное исследование линзы с целью получения конструктивных методов оптимизации характеристик линз Ротмана для использования их в МАР в диапазоне частот от 2 ГГц до 20 ГГц. В результатах статьи оценены габариты линзы, масса линзы, коэффициент передачи, простота конструкции по сравнению с разработанными ранее аналогами. Предложена методика расчета геометрии линзы Ротмана, экспериментально на векторном анализаторе цепей исследован КСВ печатной линзы Ротмана, получены конструктивные методы оптимизации характеристик линз Ротмана для использования их в многолучевых антенных решетках. Изготовлен макет широкополосной линзы Ротмана в микрополосковом исполнении с максимальным КСВ 1.3 (S21) в диапазоне рабочих частот от 2 до 20 ГГц, размер линзы составил 150x100, масса линзы составила 0.4 кг. По этим параметрам линза Ротмана превосходит разработанные ранее аналоги.

Диаграммообразующее устройство; коэффициент стоячей волны; амплитудно-фазовое распределение; многолучевые антенные решетки (МЛА).

D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov

BROADBAND DOU BASED ON ROTHMAN'S PRINTED LENS FOR MULTIBEAM ANTENNA ARRAYS

The most well-known beamforming device (DOU) (for linear and flat MAR) is the Rothman lens, which is of great interest because it allows you to form a fan of MAR rays in a wide spatial sector of angles (wide-angle scanning), has a fairly high efficiency and MAR with a lens Rothman has a low level of side lobes. Another advantage of the MAR with a Rothman lens is the weak dependence of the position of the rays in space on frequency, in contrast to the MAR with a Butler matrix DOE, in which, at a high efficiency (theoretically 100%), the position of the rays depends on the frequency. However, the previously developed analogs of the Rothman lens are large and require additional components in the design, which affects the transmission coefficient of the lens in the operating frequency range from 2 GHz to 20 GHz and the consistency of the device with other components of the transceiver equipment. It follows that the study and modernization of lens structures in relation to multibeam antenna arrays (MAR) is a topical topic for research. The purpose of the work is to propose a method for calculating the Rothman lens, modernize the lens design, make a lens model and conduct an experimental study of the lens in order to obtain constructive methods for optimizing the characteristics of the Rothman lenses for use in MAR in the frequency range from 2 GHz to 20 GHz. In the results of the article, the dimensions of the lens, the mass of the lens, the transmission coefficient, and the simplicity of the design are estimated in

comparison with the previously developed analogues. A technique for calculating the geometry of a Rotman lens is proposed, the SWR of a printed Rotman lens is experimentally studied on a vector network analyzer, constructive methods are obtained for optimizing the characteristics of Rotman lenses for use in multibeam antenna arrays. A model of a broadband Rotman lens in microstrip design with a maximum SWR of 1.3 (S21) in the operating frequency range from 2 to 20 GHz was made, the lens size was 150x100, and the lens weight was 0.4 kg. According to these parameters, the Rothman lens surpasses the analogues developed earlier.

Beam-forming device; standing wave ratio; amplitude-phase distribution; multibeam antenna arrays (MLA).

Введение. Многолучевая антенная решетка (МАР) предназначена для одновременного формирования набора лучей ДН в заданном угловом секторе без использования управляемых фазовращателей в широкой полосе рабочих частот. Это позволяет использовать МАР для построения радиоприемных систем, в которых необходимо обеспечить беспропусковой по частоте и направлению прием сигналов.

При построении широкополосных МАР часто применяются диаграммообразующие устройства на основе линзы Ротмана [1–12], позволяющей формировать веер лучей МАР в широком пространственном секторе углов со сравнительно низким уровнем боковых лепестков ДН и высоким КПД. Другим классическим достоинством МАР с линзой Ротмана является слабая зависимость положения лучей в пространстве от частоты.

К основным типам линз Ротмана относятся волноводные и печатные (полосковые), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Волноводные воздушные линзы Ротмана позволяют исключить потери в диэлектриках, достаточно просты по конструкции и позволяют обеспечить высокую повторяемость выходных параметров. К недостаткам следует отнести большой вес, большой объем механических работ и большую материалоемкость, в чем они проигрывают печатным линзам Ротмана [1–12]. Соотношение указанных достоинств и недостатков во многом определяется диапазоном рабочих частот МАР.

В последние несколько десятилетий широкое распространение получили сканирующие антенные системы, такие как фазированные антенные решетки (ФАР) и многолучевые антенные решетки (МЛАР). Большой интерес проявляется в исследовании повышения точности пеленгования в радиопеленгаторах за счет модернизация линзовых структур и применение их в многолучевых антенных решетках (МАР). Поэтому данная тема исследования является актуальной.

Ниже приведены источники, посвященные различным конструкциям МАР на основе линзы Ротмана:

Ранее в нашей работе [1] была описана печатная ДОО на базе линзы Ротмана. Был выполнен расчет в программе полного электродинамического моделирования, во временной области. Была описана оценка фазовых ошибок амплитудно-фазового распределения на выходах линзы Ротмана, предложены конструктивные методы оптимизации характеристик линзы для использования их в многолучевых антенных решетках.

Pourahmadazar J. and Denidni T.A. в статье [2] впервые представлена многолучевая коническая щелевая антенная решетка (TSA) с интегрированным волноводом в подложку, работающая на частоте 10 ГГц (SIW).

Rajabalian M. and Zakeri B. в статье [3] приведена конструкция линзы Ротмана, в которой за счет оптимизации положения портов фазовая погрешность уменьшается.

Шурховецкий А.Н., Алпатова А.В. в статье [4] изложены основные этапы разработки многолучевой антенной решетки миллиметрового диапазона с перекрытием 1,5 на основе волноводной линзы Ротмана. Приведены результаты электродинамического моделирования и эксперимента.

Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler. В [5] описана экспериментальная система PALES: многофункциональная антенная решетка в диапазоне X с широкополосным формированием луча на базе линзы Ротмана.

Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato. в статье [6] описывают линзы Ротмана, полученную путем введения новой переменной конструкции. Показан метод проектирования, минимизирующий фазовую погрешность апертуры антенны с линейной антенной решеткой.

Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang. в публикации [7] предложен новый тип многолучевой антенны на основе интегрированного волновода (SIW) для мобильной спутниковой связи с использованием методов переключения и разнесения луча. Он использует линзу SIW Ротмана в качестве сети формирования луча.

Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D. в статье [8], предложена конструкция компактной линзы Ротмана для широкоугольного сканирования. Были приведены уравнения для проектирования линзы.

Park C. S., Kim J., Min S. в статье [9] обсуждается несколько типов диэлектрических линз Ротмана. Они сравниваются и обсуждаются с точки зрения их методов возбуждения, потерь и диаграмм направленности.

Kim S., Zepeda P., Chang K. в публикации [10] описана многолучевая фазированная решетка разработанная на основе микрополосковой линзы Ротмана и фазовращателя, управляемого пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭТ) в Кадиапазоне.

Основываясь на полученных данных из статей была упорядочена и сформулирована методика расчёта геометрии линзы Ротмана, для разработки макета ДООУ на основе печатной линзы Ротмана, который работал бы в диапазоне частот в таком же или близком что и рассмотренные аналоги [1–12], а именно от 2 ГГц до 20 ГГц, имел бы минимальный размер конструкции и коэффициент передачи линзы был равен или меньше 1,5.

Расчет геометрии линзы Ротмана. Линза Ротмана представляет собой трехфокальную кабельную линзу [2] с тремя точками идеальной фокусировки, одна из которых лежит на оси линзы, а две другие расположены симметрично относительно этой оси.

Линзу Ротмана можно использовать как диаграммообразующую схему для формирования нескольких лучей линейной антенной решеткой. Для наглядности приведена схема соединения линзы Ротмана с антенной решеткой на рис. 1. Методика расчета, описанная в данной статье, основывается на формулах освещенных в работах [2, 4–15].

Принцип формирования сигнала в линзе Ротмана приведен на рис. 2. При расчете линзы Ротмана считаются заданными положение фокальных точек F_1 , F_2 и F , а следовательно и величины r_0 , S_0 , a на рис. 2, также считаются заданными ординаты точек выхода лучей y_1 (положение излучателей антенной решетки).

По этим параметрам рассчитываются контуры Σ_1 и Σ_2 линзы, а так же длина отрезков $l=t-t_0$.

В работе [2,8] приведены формулы для определения этих параметров, приведем эти формулы в наших обозначениях (все размеры нормированы относительно r_0).

Электрические длины отрезков находятся из решения квадратного уравнения (1).

$$l = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (1)$$

где

$$a = 1 - y_1^2 - \left(\frac{S_0 - 1}{S_0 - \cos\alpha}\right)^2$$

$$b = 2S_0 * \frac{\cos\alpha - 1}{S_0 - \cos\alpha} - \frac{(S_0 - 1)y_1^2 \sin^2\alpha}{(S_0 - \cos\alpha)^2} - 2y_1^2$$

$$c = \frac{S_0 y_1^2 \sin^2\alpha}{S_0 - \cos\alpha} - \frac{y_1^4 \sin^4\alpha}{4(S_0 - \cos\alpha)^2} - y_1^2$$

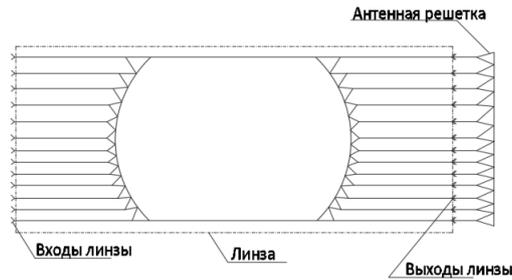


Рис. 1. Пример соединения линзы Ротмана с антенной решеткой

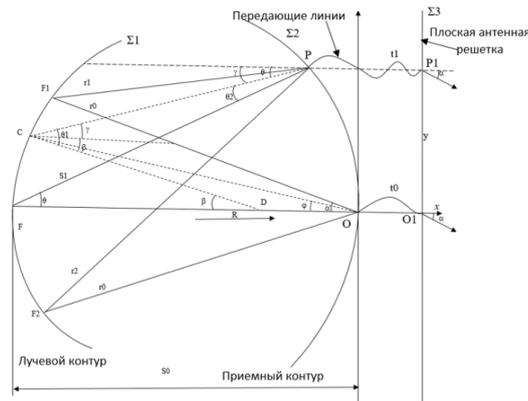


Рис. 2. Принцип формирования сигнала в линзе Ротмана

При этом знаки плюс или минус в (1) соответствуют случаям $b \geq 0$ и $b < 0$.

Профиль линзы Σ_2 в полярной системе координат S_1, θ с центром в точке F по найденным значениям l определяется уравнениями [2, 8]:

$$\sin\theta = y_1 \frac{1-l}{S_0-l} \quad (2)$$

$$S_1 = S_0 + l$$

или в декартовой системе

$$y = S_1 \sin\theta \quad (3)$$

$$x = S_1 \cos\theta - S_0.$$

Радиус окружности, проходящей через точки F_1, F_2 (контур Σ_1 линзы) находится по формуле [8]:

$$R = \frac{1+S_0^2-2S_0\cos\alpha}{2(S_0-\cos\alpha)}. \quad (4)$$

В декартовой системе координат профиль Σ_1 может быть записан [2, 8]:

$$\begin{aligned} x &= R \sin \beta \\ y &= R(1 - \cos \beta) - S_0, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь β -текущий угол.

Величина S_0 определяет фазовые ошибки на выходах линзы для облучателей, не совпадающих с фокальными точками. Близкое к оптимальному значение S_0 находится из выражения (6) [2].

$$S_0 = \left(1 + \frac{\alpha^2}{2}\right). \quad (6)$$

Используя методику, необходимо в САПР рассчитать контуры в полярной декартовой системе координат и вычислить фазовые ошибки по методу геометрической оптики.

Входными параметрами являются: S_0, α, y_1 и число входов. При расчете геометрии линзы Ротмана использован метод, который не дает информации об амплитудном распределении на выходах линзы.

Общие соотношения для КПД в ДОС. Основными требованиями, предъявляемыми к любым ДОС для МАР являются требования на высокую точность воспроизведения требуемого амплитудно-фазового распределения, высокий КПД (малые потери) и технологичность [6].

Первое требование обеспечивается разработкой методов расчета высокой точности, требованиями к точности изготовления.

Требования высокого КПД для ДОС наталкиваются на принципиальное ограничение, которое сводится к тому, что получение идеального КПД (равного 1) возможно лишь в ДОС с частотно-независимым фазовым распределением, а это означает, что положение лучей в МАР с такой ДОС будет частотнозависимым [7, 8].

Любую ДОС можно рассматривать как некоторый многополюсник с N выходами и M входами, который описывается своей матрицей рассеяния. Элемент матрицы рассеяния такого многополюсника может быть записан [8]:

$$S_{ek} = A_{ek} e^{-i\psi}, \quad \psi = k\varphi_e, \quad (7)$$

где A_{ek} – амплитуда коэффициента передачи, ψ – фаза коэффициента передачи, φ_e – фазовый сдвиг между соседними выходами.

Будем предполагать, что рассматриваемый многополюсник взаимный, т.е. входы и выходы согласованы.

При возбуждении какого-либо входа многополюсника единичной мощностью, сумма мощностей на выходах определяется выражением [8]:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N |S_{ek}|^2 &= \sum_{k=1}^N A_{ek}^2 = \xi \\ 0 &\leq \xi \leq 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Величину ξ будем, по аналогии с [5, 8], называть эффективностью l -го канала или КПД l входа ДОС.

Пусть на все входы многополюсника подана единая мощность, тогда ток на K -выходе будет:

$$I_k = \sum_{l=1}^N S_{ek}. \quad (9)$$

Сумма мощностей на выходах многополюсника, или полезная мощность $P_{\text{пол}}$ равна

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N |I_k|^2 \quad (10)$$

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N \left| \sum_{l=1}^M S_{ek} \right|^2. \quad (11)$$

Поскольку каждый вход возбужден единичной мощностью, то [8–10]

$$P_{\text{пол}} \leq M. \quad (12)$$

Знак равенства будет в случае отсутствия потерь. Квадрат суммы в (11) можно переписать следующим образом

$$|\sum_{l=1}^M S_{ek}|^2 = \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M S_{ek} S_{mk}^* \quad (13)$$

С учетом этого выражения (11) переписывается

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M S_{ek} S_{mk}^* \quad (14)$$

или

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M A_{ek} A_{mk} e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} \quad (15)$$

С учетом выражения (8) можно записать

$$\sum_{l=1}^M \xi + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M A_{ek} A_{mk} e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \leq M. \quad (16)$$

Таким образом, полученное выражение дает связь между эффективностью каждого канала и амплитудно-фазовым распределением.

Задавая амплитудно-фазовым распределением на выходах многополюсника можно оптимизировать КПД [1-4].

Рассмотрим случай равноамплитудного распределения и равной эффективности каналов, то есть $A_{ek} = A$, $\xi = \xi_e$, тогда выражение (16) примет вид:

$$M\xi + A^2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \quad (17)$$

При принятых предположениях из (8) следует

$$A^2 = \frac{\xi}{N'} \quad (18)$$

Проведя суммирование по K в выражении (17) получим

$$M\xi + \frac{\xi}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-i\frac{N+1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} * \frac{\sin\frac{N}{2}(\varphi_e - \varphi_m)}{\sin\frac{1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \leq M. \quad (19)$$

Пусть $\xi=1$, $P_{\text{пол}}=M$ тогда

$$\sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-i\frac{N+1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} * \frac{\sin\frac{N}{2}(\varphi_e - \varphi_m)}{\sin\frac{1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} = 0. \quad (20)$$

Это выражение будет справедливо, если

$$\varphi_e - \varphi_m = \frac{2\pi}{N} * P, \quad p = 1, 2, \dots \quad (21)$$

Таким образом, условие отсутствия потерь приводит к условию (21) на фазовые сдвиги.

Выражение (21) показывает, что в случае отсутствия потерь фазовые сдвиги не зависят от частоты, а это означает, что положение лучей МАР в пространстве будет зависеть от частоты, что следует из формулы [8]:

$$\sin\theta_0^l = \frac{\varphi_e}{kd}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (22)$$

где θ^l – положение l -го луча; φ_e – фазовый сдвиг между выходами ДОС; d – расстояние между излучателями; λ – длина волны.

Для МАР с частотнонезависимым положением лучей необходима ДОС с линейной зависимостью фазового сдвига от частоты, а это как следует из предыдущего рассмотрения, означает, что КПД каналов такой ДОС будет меньше 1. На основании описанных методик расчёта был разработан макет ДОУ и проведено экспериментальное исследование.

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Для настройки антенны использовался Анализатор цепей «Agilent» серии PNA-L N5235A-Option 216 с калибровочными комплектами 85056A, N4693A (модуль электронной калибровки), а также комплект гибких измерительных кабелей 85133F. В ходе эксперимента измеряли параметр S11

(КСВН) и параметр S_{21} (коэффициент передачи ДОУ) только центрального канала, а остальные входные и выходные порты были нагружены нагрузками с сопротивлением 50 Ом. Данные условия эксперимента установили с целью получения основных оптимальных характеристик центрального канала линзы в диапазоне рабочих частот от 2 ГГц до 20 ГГц без учета вносимых потерь соседних каналов.

К линзе Ротмана предъявлялись следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 2 до 20 ГГц;
- ◆ КСВН центрального канала на входе линзы не более 2 (S_{11});
- ◆ Коэффициент передачи не более 2 (S_{21});
- ◆ материал корпуса латунь ЛС59;
- ◆ число входных портов 8;
- ◆ поглотитель «Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008;
- ◆ толщина поглотителя 5 мм;
- ◆ материал линзы полистирол, наполненный двуокисью титана ПТ-16 $\epsilon=16$;
- ◆ тип портов СР-50-725 ФВ;
- ◆ масса 0.4 кг;
- ◆ число выходных портов 11.

Фотография разработанного макета линзы Ротмана и листа поглотителя представлены на рис. 4 и 5.

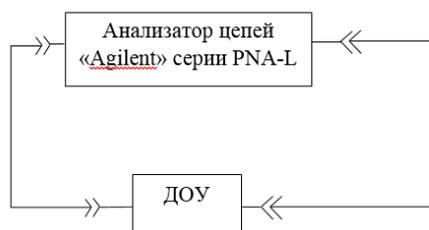


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

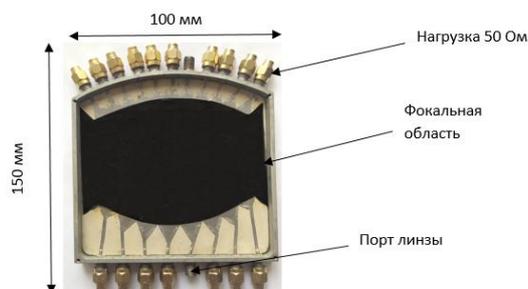


Рис. 4. Фото ДОУ на основе линзы Ротмана



Рис. 5. Поглотитель «Лист-51С»

КСВ и коэффициент передачи ДОУ параметры (S11, S21) центрального канала представлены на рис. 6 и 7.



Рис. 6. КСВ центрального канала на входе ДОУ (S11)



Рис. 7. Коэффициент передачи ДОУ (S21)

Заключение. Предложена методика расчета геометрии линзы Ротмана. Разработан макет ДОУ для диапазона частот от 2 ГГц до 20 ГГц. Проведено экспериментальное исследование макета линзы. В результате эксперимента получены графики КСВН и коэффициента передач рисунки 6 и 7. Было обнаружено, что коэффициент стоячей волны центрального канала по входу макета ДОУ (параметр S11) на частоте 13 ГГц составляет 2.8, что не является оптимальным значением. Это показывает, что по входу вносятся дополнительное переотражение мощности сигнала и данный параметр значение КСВ ухудшает согласованность линзы с другими составными частями МАР. Данная проблема решается заменой разъемов ДОУ CP-50-725 ФВ на врубные СВЧ разъемы SMP-KBB2 с низкими потерями на частотах 0.01-18 ГГц (КСВ<1.5) и подключением на входы ДОУ аттенуаторов с коэффициентом ослабления 3 дБ.

Так же на основе полученных результатов эксперимента видно, что максимальный коэффициент передачи (S21) в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц равен 1.3, что удовлетворяет заданным требованиям к ДОУ. В табл. 1 сведены параметры линзы Ротмана, полученные в результате экспериментального исследования.

Таблица 1

Основные параметры ДООУ

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Диапазон рабочих частот, ГГц	2-20	2-20
Материал корпуса	ЛС59	ЛС59
Размер ДООУ, мм	150x100	150x100
Число входных лучей, шт.	8	8
Число выходных лучей, шт.	11	11
Коэффициент передачи (S ₂₁)	не более 2	1.3
КСВ (S ₁₁)	не более 2	2.8
масса, кг	0.4	0.4
Поглотитель	«Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008	«Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008
Тип портов	СР-50-725 ФВ	СР-50-725 ФВ

Как видно из результатов исследования диаграммообразующее устройство соответствует заявленным требованиям и может быть использована в многолучевых антенных решетках в диапазоне рабочих частот от 2 до 20 ГГц, с учетом предложенных доработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Губарев Д.Е.* Разработка диаграммообразующих устройств на базе линзы Ротмана // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информатика и вычислительная техника»: Сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции. – Анапа, 2020. – С. 87-92.
2. *Pourahmadazar J. and Denidni T.A.* Multi-beam Tapered Slot Antenna Array Using Substrate Integrated Waveguide Rotman Lens // Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA). – 2015. – P. 1457-1450.
3. *Rajabalian M. and Zakeri B.* An Implemented Non-Focal Rotman Lens // Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA). – 2015. – P. 1415-1418.
4. *Шурховецкий А.Н., Алпатова А.В.* Многолучевая антенная решетка миллиметрового диапазона на основе волноводной линзы Ротмана // Радиотехника. – 2018. – № 11. – С. 94-98.
5. *Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler.* The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – June 2007. – Vol. 49, No. 3. – P. 95-107.
6. *Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato.* An improved design method of Rotman lens antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation. – May 1984. – Vol. AP-32, No. 5. – P. 524-527.
7. *Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang.* Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications // IEEE Transactions on antennas and propagation. – August 2008. – Vol. 56, No. 8. – P. 2504-2513.
8. *Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D.* Rotman lens with equal height of array and feed contours // IEEE Transactions on antennas and propagation. – August 2003. – Vol. 51, No. 8. – P. 2048-2056.
9. *Park C.S., Kim J., Min S.* TM₀ mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2007. – Vol. 6. – P. 584-587.
10. *Kim S., Zepeda P., Chang K.* Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens // IEEE Microwave and wireless components letters. – April 2005. – Vol. 15, No. 4. – P. 247-249.

11. Зеленин И.А., Рыжиков А.Г., Федоров С.М. AP на основе линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. Радиоэлектроника и системы связи. – 2012.
12. Hall L., Hansen H., Abbott D. Rotman lens for mm-wavelengths // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4935. – P. 215-221.
13. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Ч. 2. Антенны: учебное методическое пособие. – Томск: ТУСУР, ТМЦДО, 2003. – 130 с.
14. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
15. Tao Y.M., Delisle G.Y. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications // IEEE Trans. On Antennas and propagation. – May 1997. – Vol. AP-32, No. 5. – P. 2206-2209.
16. Крюков Д.Ю., Курьянов Ю.С., Пастернак Ю.Г. Исследование ДООУ МЛАР на основе плоской линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. Радиоэлектроника и системы связи. – 2014.
17. Карпунин В.И., Неверетдинов Р.Р. Особенности пеленгационных характеристик МЛА с линзами Ротмана // Антенны. – 2018. – № 6. – С. 41-46.
18. Suarez F.C., Mendez D.N. and Baquero-Escudero M. Rotman lens with ridge gap waveguide technology for millimeter wave applications // Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2013. – P. 4006-4009.
19. Nussler D., Fuchs H.-H., Brauns R. Rotman Lens for the millimeter wave frequency range // Proceedings of the 37th European Microwave Conference (EuMA). – 2007. – P.696-699.
20. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems // The Journal Electronic Defense. – Yune 2015. – P. 39-46.

REFERENCES

1. Gubarev D.E. Razrabotka diagrammoobrazuyushchikh ustroystv na baze linzy Rotmana [Development of diagram-forming devices based on the Rotman lens], *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Informatika i vychislitel'naya tekhnika»: Sb. statey II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [The state and prospects of development of modern science in the direction of "Computer Science and computer engineering": Collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference], Anapa, 2020, pp. 87-92.
2. Pourahmadazar J. and Denidni T.A. Multi-beam Tapered Slot Antenna Array Using Substrate Integrated Waveguide Rotman Lens, *Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA)*, 2015, pp. 1457-1450.
3. Rajabalian M. and Zakeri B. An Implemented Non-Focal Rotman Lens, *Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA)*, 2015, pp. 1415-1418.
4. Shurkhovetskiy A.N., Alpatova A.V. Mnogoluchevaya antennaya reshetka millimetrovogo diapazona na osnove volnovodnoy linzy Rotmana [Multipath antenna array of the millimeter range based on a Rotman waveguide lens], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2018, No. 11, pp. 94-98.
5. Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler. The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, June 2007, Vol. 49, No. 3, pp. 95-107.
6. Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato. An improved design method of Rotman lens antennas, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, May 1984, Vol. AP-32, No. 5, pp. 524-527.
7. Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang. Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, August 2008, Vol. 56, No. 8, pp. 2504-2513.
8. Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D. Rotman lens with equal height of array and feed contours, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, August 2003, Vol. 51, No. 8, pp. 2048-2056.
9. Park C.S., Kim J., Min S. TM0 mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2007, Vol. 6, pp. 584-587.

10. Kim S., Zepeda P., Chang K. Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens, *IEEE Microwave and wireless components letters*, April 2005, Vol. 15, No. 4, pp. 247-249.
11. Zelenin I.A., Ryzhikov A.G., Fedorov S.M. AR na osnove linzy Rotmana [AR based on the Rotman lens], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Radioelektronika i sistemy svyazi* [Bulletin of the Voronezh State Technical University. Radio electronics and communication systems], 2012.
12. Hall L., Hansen H., Abbott D. Rotman lens for mm-wavelengths, *Proceedings of SPIE*, 2002, Vol. 4935, pp. 215-221.
13. Goshin G.G. Ustroystva SVCh i anteny. Ch. 2. Antenny: uchebnoe metodicheskoe posobie [Microwave devices and antennas. Part 2. Antennas: a training manual]. Tomsk: TUSUR, TMTSDO, 2003, 130 p.
14. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. Proektirovanie linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv [Design of lens, scanning, wide-band antennas and feeder devices]. Moscow: Energiya, 1973, 440 p.
15. Tao Y.M., Delisle G.Y. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications, *IEEE Trans. On Antennas and propagation*, May 1997, Vol. AP-32, No. 5, pp. 2206-2209.
16. Kryukov D.Yu., Kur'yanov Yu.S., Pasternak Yu.G. Issledovanie DOU MLAR na osnove ploskoy linzy Rotmana [DOE MLAR research based on Rotman's flat lens], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Radioelektronika i sistemy svyazi* [Bulletin of the Voronezh State Technical University. Radio electronics and communication systems], 2014.
17. Karpukhin V.I., Neveretdinov R.R. Osobennosti pelengatsionnykh kharakteristik MLA s linzami Rotmana [Features of direction finding characteristics of MLA with Rotman lenses], *Antenny* [Antennas], 2018, No. 6, pp. 41-46.
18. Suarez F.C., Mendez D.N. and Baquero-Escudero M. Rotman lens with ridge gap waveguide technology for millimeter wave applications, *Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013, pp. 4006-4009.
19. Nussler D., Fuchs H.-H., Brauns R. Rotman Lens for the millimeter wave frequency range, *Proceedings of the 37th European Microwave Conference (EuMA)*, 2007, pp. 696-699.
20. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems, *The Journal Electronic Defense*, Yune 2015, pp. 39-46.

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

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89614132918; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gubarev Dmitriy Evgen'evich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of A&RPU; post-graduate student.

Yukhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; phone: +79614132918; the department of A&RPU; head of the department; dr. of eng. sc.; professor.

Раздел III. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-165-179

Э.В. Кулиев, В.А. Семенов, А.В. Котельва, С.В. Игнатъева

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР АЛГОРИТМА ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ*

Алгоритм дерева решений является распространенным алгоритмом классификации в технологии интеллектуального анализа данных, и его результаты обычно выражаются в виде правил «если-то». Алгоритм C4.5 является одним из алгоритмов дерева решений, который обладает преимуществами простоты понимания и высокой точности, а также усовершенствован добавлением скорости прироста информации по сравнению с его предшественником - алгоритмом ID3. После теоретического анализа информации выбирается алгоритм C4.5 для анализа результатов служебной аттестации, и создается дерево решений для служебной аттестации путем сбора данных, предварительной обработки данных, расчета коэффициента прироста информации и определения атрибутов разделения. Система разработана в архитектуре B/S, а платформа управления проектом R&D, который может выполнять анализ оценки эффективности с помощью инструментов визуализации алгоритма дерева решений и динамических веб-страниц. Система включает в себя хранение информации, управление задачами, формирование отчетов, контроль полномочий и ролей, визуализацию информации и другие функциональные модули управленческой информационной системы. Они могут реализовать функции управления проектом, такие как создание и управление проектом, поток задач, заполнение и управление информацией о сотрудниках, создание системы оценки эффективности, создание отчетов различных размеров, построение управления. Используя алгоритм дерева решений в качестве основной технологии, система получает научную надежную информацию об управлении проектами с высокой точностью и реализует визуализацию данных, что может помочь предприятиям создать хорошую систему управления в эпоху больших данных. Рассмотрены управление задачами, формирование отчетов, контроль полномочий ролей, визуализация информации и другие функциональные модули управленческой информационной системы

Алгоритм дерева решений; интеллектуальный анализ данных; классификация; большие данные.

E.V. Kuliev, V.A. Semenov, A.V. Kotelva, S.V. Ignateva

ANALYTICAL REVIEW OF THE DECISION TREE ALGORITHM IN DATA INTELLIGENCE TECHNOLOGY

The decision algorithm is the preferred filtering algorithm in data mining technology, and its results are usually chosen in the form of "if-then" rules. Algorithm C4.5 is one of the decision algorithms that takes advantage of the ease of understanding and increasing importance, and also takes advantage of the advanced information rate gain of its advanced ID3 algorithm. After the theoretical analysis of the information, the algorithm C4.5 is selected to analyze the results of performance appraisal, and enterprise performance appraisal decisions by collecting data, pre-processing data, calculating information gain and determining selection parameters. The system is

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–21–00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.

developed in B/S architecture, an R&D project management platform that can perform evaluation analysis with decision analysis results evaluation tools and web coverage. The system includes information storage, task management, reporting, receipt and presentation control, information visualization and other functions of the management information system functions. They can realize project management functions, such as creating and managing a project, flow tasks, filling and managing information about functions, creating a performance evaluation system, creating reports of various sizes, building management. decision decision algorithm as the core technology, the system acquires scientific significant project management information with high data accuracy, and realizes visualization, which can help the enterprise to have a good management system in large areas. Task management, reporting, audit control, information visualization and other functions of the system's management reporting management functions are included.

Decision tree algorithm; data mining; classification; big data.

Введение. С непрерывным развитием и прогрессом компьютерных технологий и технологий больших данных появляется множество новых идей и методов для управления интернет-предприятиями. Использование интернет-технологий и анализа больших данных для эффективного управления делами предприятия повышает основную конкурентоспособность предприятий, способствует прогрессу в выполнении корпоративных проектов, повышает эффективность и мотивацию сотрудников, снижает стоимость эксплуатации и обслуживания предприятий. Применение компьютеров и технологий больших данных для управления предприятием может полностью повысить эффективность управления предприятием [1]. Все больше и больше интернет-предприятий используют различные системы для управления предприятием. Эти системы могут помочь предприятиям управлять проектами и задачами, назначать работу сотрудникам. С помощью этих систем можно управлять проектами быстрее и эффективнее. В управлении бизнесом ключевую роль в развитии компании играют оценка эффективности сотрудников и анализ стоимости проектов. Справедливая система оценки может повысить мотивацию сотрудников, повысить качество выполнения проектов, повысить креативность и ответственность сотрудников. Использование технологии интеллектуального анализа данных в сочетании с системой управления корпоративными проектами на основе информации, сообщаемой сотрудниками в системе для анализа и оценки эффективности сотрудников, может помочь сотрудникам планировать и давать справочные рекомендации руководству.

В то же время, используя данные управления проектами и результаты оценки эффективности, можно проанализировать стоимость предприятия и сделать более научное распределение в соответствии со способностью сотрудников способствовать научному и устойчивому развитию предприятия. Система управления проектами R&D (Research and Development) предназначена для управления проектами интернет-предприятий, занимающихся разработкой программного обеспечения. С помощью этой системы менеджеры проектов планируют и управляют задачами, связанными с проектами разработки программного обеспечения, организуют и координируют жизненный цикл проекта и обеспечивают эффективное достижение конечной цели проекта с помощью эффективной системы управления. В статье мы используем алгоритм дерева решений в интеллектуальном анализе данных для анализа результатов оценки эффективности, полученных сотрудниками в системе, создания дерева решений для анализа результатов, которые могут помочь сотрудникам понять цель оценки эффективности, сделать дальнейшее планирование для собственной работы и повышения эффективности работы. В то же время дерево решений может непосредственно генерировать результаты служебной аттестации сотрудников, что может в будущем снизить нагрузку на руководителей предприятия, а также сделать служебную аттестацию более справедливой и прозрачной, мобилизовать мотивацию работников предприятия. По результатам аттестации

сотрудников поощряют, наказывают и ранжируют, а также определяют их вознаграждение и совмещают с расходами в управлении проектами, формируются отчеты по каждому измерению предприятия и отображаются в наглядной форме, что делает затраты предприятия яснее и помогает руководству предприятия понять положение предприятия, чтобы сформулировать следующую стратегию и разумно распределить работу сотрудников в соответствии с их способностями, тем самым повысить конкурентоспособность на рынке предприятия [2–3]. Алгоритм дерева решений, как распространенный алгоритм интеллектуального анализа данных, также широко используется во многих областях.

Исследования алгоритмов дерева решений продолжаются с целью повышения точности алгоритмов дерева решений и их объединения с соответствующими методами в других областях для получения дополнительных преимуществ. Алгоритмы дерева решений широко используются в образовании, служебной аттестации, исследованиях и других областях. В статье мы используем облегченную среду MVVM Vue.js в сочетании с языком C#, базой данных SQL Server, языком ассемблера JavaScript и другими технологиями разработки для разработки и проектирования системы управления проектами R&D. На основе алгоритма дерева решений C4.5 набор данных, созданный в системе, обучается и анализируется для создания дерева решений, связанного с оценкой производительности. Путем тестирования и анализа дерева решений, выясняем моменты, на которые руководитель проекта обращает внимание при подсчете аттестации и формируем полную систему аттестации на основе атрибутов аттестации в системе и дерева решений. Инструменты визуализации используются для создания отчетов о затратах, связанных с предприятием. Посредством управления проектами, задачами и сотрудниками система реализует функции управления проектами, такие как создание и управление проектами, поток задач, заполнение информации о сотрудниках и управление ими, создание системы служебной аттестации, создание отчетов по каждому измерению и построение кабины управления. В этом документе алгоритм дерева решений C4.5 используется в качестве базовой технологии для получения высокоточных результатов оценки производительности и эффективной системы управления проектами, визуализации данных о затратах на основе системных данных, и помочь предприятиям создать хорошую систему управления и систему оценки эффективности. С помощью этих систем можно управлять проектами быстрее и эффективнее. В управлении бизнесом ключевую роль в развитии компании играют оценка эффективности сотрудников и анализ стоимости проектов [4].

Сбор данных. Интеллектуальный анализ данных заключается в анализе фактических данных для получения скрытых данных, которые люди не могут видеть напрямую, которые являются большими, случайными, нечеткими и прерывистыми, а скрытые данные неизвестны и полезны. С развитием баз данных управление данными становится все более сложным, а количество генерируемых данных становится все больше и больше. В этом контексте была разработана технология интеллектуального анализа данных для извлечения информации из данных, которые нам нужны, но которые трудно найти. Этот метод в настоящее время широко используется в управлении производством, научных исследованиях, анализе рынка и инженерном проектировании [5–7]. Интеллектуальный анализ данных – это междисциплинарная дисциплина, включающая множество дисциплин, в основном интеграцию искусственного интеллекта, базы данных, статистики, технологии визуализации, и другие дисциплины для сбора и анализа данных для получения некоторой полезной информации, которая может помочь лицам, принимающим решения, принять правильное решение и снизить ненужные риски. Основные этапы показаны на рис. 1.



Рис. 1. Этапы интеллектуального анализа данных

Подготовка данных заключается в сборе и организации информации, которую необходимо извлечь, и на практике в сборе данных для ваших собственных целей или в создании ваших собственных данных из собранных наборов данных. Интеграция данных – это обработка собранных данных в соответствии с потребностями пользователя и пониманием характеристик поля, в основном недостающие части данных и очистка грязных данных в данных. Следующим шагом является выбор данных, т.е. выбор данных в базе данных и идентификация набора данных для анализа, чтобы сузить область обработки и улучшить качество интеллектуального анализа данных. Предварительная обработка данных заключается в очистке данных с помощью статистики, алгоритмического анализа и других методов, удалении ненужных шумовых данных, чтобы получить нужный нам достоверный и стандартизированный набор данных. для обеспечения целостности и непротиворечивости набора данных [6–10]. Интеллектуальный анализ данных сначала определяет цель, то есть тип знаний, которые необходимо обнаружить, затем выбирает подходящий алгоритм интеллектуального анализа данных в соответствии с определенной целью, использует алгоритм для корреляции или классификации набора данных, извлекает соответствующие знания и, наконец, выражает это в той или иной форме. Наконец, извлеченные знания анализируются, и полезная информация извлекается из знаний и отображается с помощью инструментов визуализации. Основными методами интеллектуального анализа данных являются классификация, оценка, прогнозирование, правила ассоциации и кластеризация, где классификация, оценка и прогнозирование представляют собой управляемый интеллектуальный анализ данных, который может построить модель, которая может описывать определенные атрибуты с помощью данных, а также правила ассоциации и кластерный анализ. неуправляемый интеллектуальный анализ данных, которые используют все атрибуты, чтобы найти определенную связь.

Классификация – термин относится к контролируемому обучению. Алгоритмы классификации требуют, чтобы классы определялись на основе переменных. Характеристики данных определяют, к какому классу принадлежит. Распознава-

ние образов – один из типов задач классификации, в которых входные данные (образцы) классифицируются по различным классам на основе их сходства с определенными классами.

В реальной жизни мы часто видим, как предсказывают будущие вещи / ценности / или иначе, основываясь на прошлых и настоящих данных [7, 11]. Прогнозирование также является разновидностью классификационной задачи. В зависимости от типа приложения, например прогнозирование наводнения, где зависимыми переменными являются уровень воды в реке, ее влажность, масштаб дождя и т.д. являются атрибутами.

Регрессия – статистический метод, который используется для определения взаимосвязи между переменными (x) и зависимыми переменными (y). Существует несколько типов регрессии, таких как линейная, логистическая и т.д. Линейная регрессия используется для непрерывных значений, а логистическая регрессия используется там, где существует возможность только двух событий, таких как пройдено / сбой, истина / ложь, да / нет и т.д.

Кластеризация аналогична классификации [2, 12], т.е. группирует данные. Кластеризация относится к неконтролируемому машинному обучению. Это процесс разделения данных на группы на основе схожих типов данных.

Обобщение – не что иное, как характеристика или обобщение. Он извлекает значимую информацию из данных. Он также дает сводку числовых переменных, таких как среднее значение, режим, медиана и т. д.

Правила ассоциации – основная задача Data Mining. Помогает находить подходящие закономерности и значимые выводы из базы данных. Правило ассоциации – модель, которая извлекает типы ассоциаций данных. Например, анализ рыночной корзины, в котором правила ассоциации применяются к базе данных, чтобы узнать, какие товары покупает вместе покупатель.

Различные методы интеллектуального анализа данных имеют свои собственные алгоритмы интеллектуального анализа данных, такие как алгоритм дерева решений для классификации, регрессионный анализ для прогнозирования и кластеризация K-средних для кластеризации, которые описаны на рис. 2 .

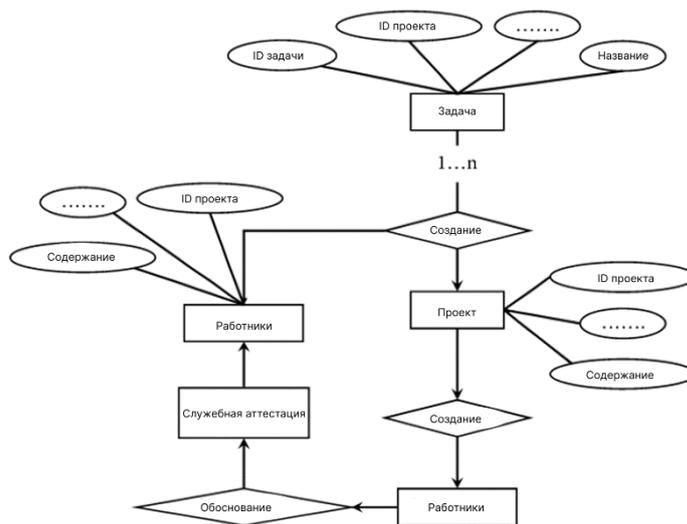


Рис. 2. Классификация алгоритмов интеллектуального анализа данных

Алгоритм, используемый в данной статье, представляет собой алгоритм дерева решений в алгоритме классификации. Среди алгоритмов классификации интеллектуального анализа данных метод классификации дерева решений имеет то преимущество, что он прост для понимания и не требует слишком много специальных базовых знаний по сравнению с другими методами классификации. Дерево решений – это алгоритм обучения с учителем, который работает как для дискретных, так и для непрерывных переменных [13]. Он разбивает набор данных на подмножества на основе наиболее значимого атрибута в наборе данных. Алгоритмы определяют, как дерево решений идентифицирует этот атрибут и как это разделение выполняется.

Наиболее значимый предиктор обозначается как корневой узел, выполняется разделение для формирования подузлов, называемых узлами решения, а узлы, которые не разделяются дальше, являются конечными или листовыми узлами.

В дереве решений набор данных разделен на однородные и неперекрывающиеся области. Он следует нисходящему подходу, поскольку верхняя область представляет все наблюдения в одном месте, которое разделяется на две или несколько ветвей, которые далее разделяются. Этот подход также называют жадным, поскольку он учитывает только текущий узел между работающими, не фокусируясь на будущих узлах. Алгоритмы дерева решений будут продолжать работать до тех пор, пока не будут достигнуты критерии остановки, такие как минимальное количество наблюдений и т.д.

После построения дерева решений многие узлы могут представлять выбросы или зашумленные данные [8]. Для удаления ненужных данных применяется метод обрезки дерева. Это, в свою очередь, повышает точность модели классификации. Для определения точности модели используется тестовый набор, состоящий из тестовых кортежей и меток классов. Процент кортежей тестового набора правильно классифицируется моделью для определения точности модели. Если модель оказывается точной, она используется для классификации кортежей данных, для которых неизвестны метки классов [14].

Результаты, генерируемые деревьями решений, обычно выражаются в форме правил «если-то», которые ясны и просты и широко используются во многих областях, таких как финансовая отрасль, метеорологический анализ и управление дорожным движением. Корневой узел представляет атрибут дерева, листья представляют маркеры классификации, а ветви представляют выходные результаты. Метод начинается с корневого узла и проходит по дереву, назначая экземпляры его дочерним элементам на основе результатов теста. Каждый дочерний узел принимает значение для этой функции и продолжает тестировать и назначать экземпляры с помощью рекурсивного метода, пока не достигнет конечного узла, где экземпляры окончательно назначаются классу конечного узла.

В дереве решений есть два типа наборов данных: набор выборочных данных и набор тестовых данных. Набор выборочных данных представляет собой набор данных, в которых известны атрибуты и классификации, и алгоритм используется для обучения набора выборочных данных для создания соответствующего дерева решений. Набор тестовых данных используется для проверки сгенерированного дерева решений, внесения данных в дерево решений, получения окончательных категорий, сравнения с фактическими типами и измерения точности дерева решений.

Алгоритм дерева решений эффективен, прост для понимания, имеет небольшой объем вычислений и хорошо справляется с дискретными данными. О дереве решений можно судить на основе его правильности, его эффективности после тестирования выборочного набора данных, а также его сложности, косвенности и

масштаба [15]. Информационная энтропия является ключевым элементом алгоритмов дерева решений, где слово «энтропия» используется в термодинамике и представляет собой меру степени хаоса в системе в физике.

В 1948 г. Шеннон, отец теории информации, заимствовал понятие энтропии и ввел информационную энтропию, которая определяется как вероятность возникновения дискретных случайных событий. Вообще говоря, чем выше вероятность появления сообщения, тем больше оно цитируется, и чем ниже информационная энтропия, тем выше вероятность появления сообщения. Формула расчета информационной энтропии определяется следующим образом: его эффективность после тестирования выборочного набора данных, а также его сложность, косвенность и масштаб.

$$G(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{-q_i}{\ln q_i} \quad (1)$$

$$q_i = \frac{\pi}{\sqrt{x+y}} \quad (2)$$

Алгоритмы дерева решений обычно состоят из трех шагов: выбор признаков, создание дерева решений и обрезка дерева решений. Обычно используемые алгоритмы дерева решений включают алгоритм ID3 и алгоритм C4.5, основанный на максимальной скорости получения информации, который улучшен по сравнению с алгоритмом ID3, и CART, основанный на индексе Джини.

Оптимизация модели дерева решений. Алгоритм основан на концепции получения информации для выбора классификационных признаков дерева решений. Величина прироста информации представляет собой разницу между уровнем примеси выборочных данных до классификации и уровнем примеси после классификации. Алгоритм ID3 основан на теории информации и использует информационную энтропию и прирост информации в качестве критериев для классификации существующих наборов данных. При построении дерева решений учитывается прирост информации для каждого выбора узла ветвления [11, 16]. Прирост информации всех атрибутов вычисляется и сравнивается, и атрибут с наибольшим приростом информации берется в качестве атрибута разделения, а последующие листовые узлы продолжают циклически выполнять эту операцию для создания дерева решений. Алгоритм ID3 может работать только с дискретными атрибутами, n категорий, а вероятность каждой категории равна $P(C_1), P(C_2), \dots, P(C_n)$, и тогда информационная энтропия атрибута A после разбиения будет следующей:

$$P(C_i) = \frac{\sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n c_i^2}}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n c_i^2} \quad (3)$$

$$G(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (4)$$

$$G(x) = \frac{\sqrt{c_1 + c_2 + \dots + c_n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n c_i^2} \quad (5)$$

Третий шаг требует прироста информации, который представляет собой разницу между информационной энтропией, полученной на первом этапе, и информационной энтропией, полученной на втором этапе для атрибута C . Формула выглядит следующим образом:

$$G(A) = Q(x) - Q_i(x) \quad (6)$$

$$Q(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n q_i \quad (7)$$

Чем выше прирост информации, тем более подходит атрибут для классификации, и атрибут выбирается в качестве текущего узла. Столбцы атрибута исключаются из списка, а остальные данные перебираются с первого шага. Когда в классификации имеется только одно значение целевого атрибута или доля всех значений атрибута достигает порога, итерация завершается. Окончательное дерево решений формируется после завершения итерации.

После выполнения алгоритма C4.5 получают результат скорости прироста информации всех атрибутов, и в качестве разделяемого атрибута текущего узла выбирается атрибут с наивысшей скоростью прироста информации. Остальные атрибуты будут продолжать вычисляться рекурсивно. По мере того, как атрибуты постепенно вычисляются, скорость получения информации становится все меньше и меньше, и в качестве атрибута классификации выбирается атрибут с относительно большей скоростью получения информации. Блок-схема C4.5 показана на рис. 3.

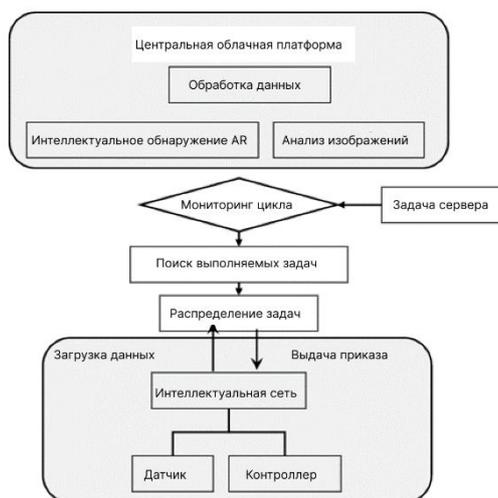


Рис. 3. Схема алгоритма C4.5

Обрезка дерева решений. Обучающая выборка является ключевым фактором в построении дерева решений. Когда обучающая выборка слишком мала или есть проблемы с данными, результирующее дерево решений может быть аномальным, что может привести к неточным деревьям решений и может сделать дерево решений очень сложным. Согласно исследованию, не все сложные и большие деревья решений приводят к более точным наборам правил. Следовательно, сложные деревья решений необходимо упрощать, что называется обрезкой [17]. Предварительная обрезка происходит во время построения дерева решений, когда рост прекращается в начале процесса вычислений и выполняется обрезка. Предварительная обрезка проста, но трудно определить время завершения во время роста дерева решений, что делает ее не очень практичной. Общий алгоритм дерева решений использует обрезку. Обрезка выполняется на полностью сформированном дереве решений восходящим образом, заменяя поддеревья узлов конечными узлами, не отвечающими доверительному уровню, и помечая класс наиболее часто используемым классом в поддереве узлов. Этап обрезки повторяется до тех пор, пока все узлы не будут удовлетворены условию, и итоговое сгенерированное дерево решений не станет более надежным, чем предыдущее дерево решений [18]. По сравнению с предварительной обрезкой, обрезка уменьшает количество предполагаемых вмешательств.

В настоящее время большинство существующих информационных систем управления проектами разрабатываются и проектируются с использованием архитектуры V/S, которая представляет собой модель архитектуры браузер-сервер, и пользователи обычно получают доступ к системе через браузер. Система V/S имеет преимущества простоты обслуживания и обновления, низкой стоимости, безопасности и т.д. Внешний интерфейс использует Vue.js, восходящую прогрессив-

ную среду MVVM для создания пользовательских интерфейсов, а сервер использует C#, объектно-ориентированный фреймворк, ориентированный язык разработки, производный от C++.

MVC – аббревиатура от Model-View-Controller, которая представляет собой структуру для многоуровневых систем, разделяющую бизнес-логику, данные и интерфейсы отображения. Платформа накладывается на систему, а бизнес-логика, данные и интерфейс отображения разделены, чтобы более четко разграничить их соответствующие функции. Уровень модели обычно используется для обработки логической части данных приложения, обычно отвечающей за доступ к базе данных. Слои представления – это слои отображения, который обрабатывает отображаемую часть данных и создается на основе данных модели [19]. Уровень контроллера – часть взаимодействия с пользователем, которая считывает данные со слоя представления, контролирует ввод данных пользователем и отправляет их на уровень модели.

Платформа MVC обладает такими преимуществами, как низкая связанность, возможность многократного использования, низкая стоимость жизненного цикла, высокая ремонтопригодность и быстрое развертывание. Однако это увеличивает сложность структуры и реализации системы, а для некоторых простых страниц использование фреймворка MVC может привести к снижению эффективности его работы; в то же время может быть неэффективный доступ представления к модели; тесная связь между представлением и контроллером приведет к их независимому повторному использованию. Фреймворк MVVM – это аббревиатура от Model-View-ViewModel, которая представляет собой улучшенную версию, основанную на фреймворке MVC и фреймворке MVP. Это очень затрудняет поддержку шаблона MVC. Это связано с тем, что контроллер для обработки логики и преобразования данных в сложных проектах становится очень большим и сложным в обслуживании, поэтому, чтобы изменить ограничения этой модели, логическая обработка и преобразование данных контроллера убраны из него, а для управления этими операциями создан специальный объект ViewModel. Такой подход делает код контроллера очень маленьким и простым в управлении. Это делает инфраструктуру MVVM основной платформой, используемой при разработке программного обеспечения на данном этапе.

Анализ оптимизации на основе алгоритма дерева решений. Справедливая и ответственная система оценки будет стимулировать мотивацию сотрудников, повышать эффективность и мотивацию сотрудников, повышать конкурентоспособность предприятия. Сегодня, с быстрым развитием Интернета, оценка эффективности с помощью интеллектуального анализа данных станет новым способом [20, 21]. Когда сотрудник отправляет задачу с помощью этой системы, система будет фиксировать время выполнения задачи и количество кодов, отправленных сотрудником, а руководитель проекта будет оценивать сотрудника на основе информации, предоставленной сотрудником. Используя эти данные, можно проанализировать производительность сотрудника с помощью алгоритма дерева решений. Перед интеллектуальным анализом данных сначала определяются выборочные данные, и данные выбираются из информации, заполняемой сотрудниками, и оценок персонала, введенных менеджерами. Поскольку компания занимается разработкой программного обеспечения, данные в основном собирались у сотрудников компании, занимающихся исследованиями и разработками. Было собрано 270 данных, 180 из которых использовались в качестве обучающего набора данных для алгоритма дерева решений, а остальные использовались в качестве тестового набора данных. Набор данных в основном состоит из таблицы информации о сотрудниках системы, рабочей ситуации сотрудника в соответствии с задачей и оценки сотрудника менеджером за период времени. Информационная таблица сотрудников: в основном это информация о сотрудниках при их регистрации в сис-

теме, среди которых критерии оценки эффективности, следующие: ФИО, отдел, специальность, степень и т.д. Статус работы: этот набор данных определяется представлением задач сотрудника, такие как заполнение часов, завершение работы, эффективность выполнения работы и т. д. Эти данные автоматически рассчитываются системой после заполнения данных сотрудником и сохраняются в разных таблицах системы и резюмируются операторами SQL. Оценка сотрудников: эти данные оцениваются руководством проекта в зависимости от результатов работы подчиненных сотрудников.

В процессе получения набора данных есть много данных с нулевым значением. Для этих данных мы оцениваем данные перед вводом значения переменной в системную базу данных и запрещаем отображение данных как нулевых [3]. Многие из приведенных выше значений переменных извлекаются из других таблиц базы данных в системе, и когда мы получим эти данные, мы заполним пустые значения перед вводом, и правила заполнения, следующие: количество кода: эти данные равны нулю, что означает у сотрудника нет записи о отправке кода в этот период времени, и он записывается как 0 значение. Данные пустые, значит сотрудник не заполнил часы за этот период времени. Поскольку уровень заполнения связан с посещаемостью сотрудника, если он пуст, сотрудник может найти свои записи о посещаемости в листе посещаемости и рассчитать процент заполнения [9]. Способность к обучению, технические способности, эффективность работы: если эти данные пусты, руководитель сотрудника не оценивал его, а оценка по умолчанию – средний балл.

В процессе сбора данных могут быть некоторые случайные ошибки или ошибки, которые называются зашумленными данными. Появление зашумленных данных может привести к большим ошибкам в результатах интеллектуального анализа данных. Следовательно, нам нужно предварительно обработать зашумленные данные; обычно методы работы с зашумленными данными, следующие: регрессия, упаковка, проверка комбинации человек-компьютер, кластеризация и т. д. Например, когда данные объема кода ненормальны, среднее значение данных может использоваться для замены данные о шуме. Кроме того, можно использовать принцип алгоритмов множественной регрессии для сглаживания шумовых данных.

Поскольку алгоритм дерева решений не может обрабатывать непрерывные значения, необходимо дискретизировать непрерывные переменные перед интеллектуальным анализом данных, как показано на рис. 4. Путем тестирования и анализа дерева решений мы выясняем моменты, на которые руководитель проекта обращает внимание при подсчете аттестации, и формируем полную систему аттестации на основе атрибутов аттестации в системе и дереве решений.

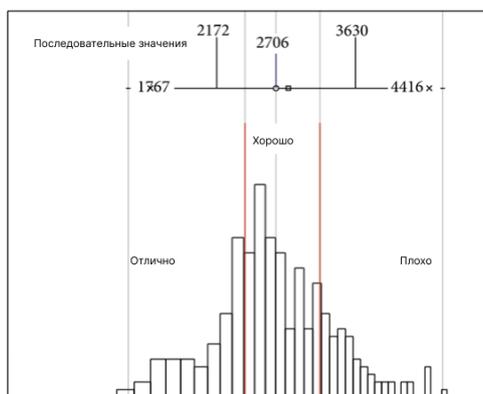


Рис. 4. Последовательные значения коэффициента заполнения работы

В данной работе берется отчет сотрудников компании, использующих эту систему в определенном месяце 2021г., и в соответствии с описанным выше процессом обработки данных мы получаем набор данных на рис.5, а данные в таблице взяты из оценочных баллов 30 сотрудников отдела разработки программного обеспечения компании в январе 2021г. В процессе собственно расчета возьмем данные 30 сотрудников этого отдела в первой половине 2021г. для алгоритма дерева решений. В процессе фактического расчета мы возьмем данные 30 сотрудников отдела в первом полугодии 2021г. для расчета алгоритма дерева решений и 90 данных в третьем квартале 2021г. для проверки результатов алгоритма дерева решений. Система может автоматически генерировать деревья решений на основе набора данных, и посредством анализа деревьев решений мы можем выяснить, какие модули беспокоят менеджеров при оценке эффективности – объем кода и завершение работы. Эти данные получены из информации, сообщаемой сотрудниками в системе, которая требует, чтобы сотрудники планировали свои задачи в своей повседневной работе, выполняли их вовремя и своевременно сообщали о своих расходах в систему. Сгенерированный алгоритм дерева решений записывается системой и впоследствии используется для оценки служебной аттестации.

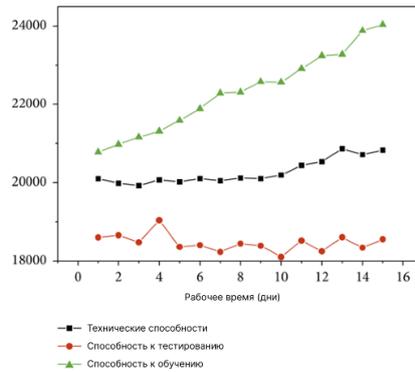


Рис. 5. Набор данных для обучения алгоритму

Целью примера является окончательный результат оценки служебной аттестации, а классом целей является «результат оценки» с четырьмя значениями: А, В, С и D. В 180 извлеченных наборах данных четыре значения следующие: 59, 92, 25 и 4.

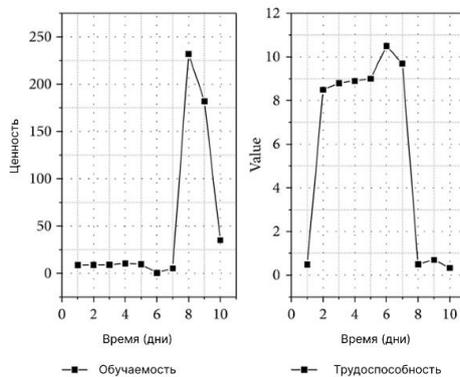


Рис. 6. Набор тестовых данных

Результаты оценки 90 тестовых образцов сравниваются с результатами оценки, полученными с помощью алгоритма дерева решений C4.5 и алгоритма дерева решений ID3, из которых 30 тестовых образцов перечислены здесь для экономии места. После создания каждого проекта участники проекта должны создать несколько задач в рамках проекта. Типы задач могут быть созданы системным администратором. В пакете задач также необходимо оценить затраты, которые будут израсходованы в рамках этого модуля. После создания задачи участники проектной группы, которым необходимо выполнить задачу, должны создать карточки задач под задачей, которые определены как краткосрочные планы и цели для участников проекта в процессе выполнения задачи. Модуль управления персоналом является ядром этой статьи. а ключевой функцией исследования является система оценки эффективности сотрудников, основанная на расчете дерева решений. В модуле управления сотрудниками, во-первых, сотрудники создают свои собственные учетные записи и заполняют информацию [2]. Затем системный администратор заполняет организацию сотрудника и другую информацию о сотруднике.

Существует два вида управления персоналом: один – это управление подчиненным персоналом руководителем проекта, а другой – самоуправление персоналом. Во-первых, сотрудники могут назначать свои задачи и устанавливать свои карточки в системе, а в системе есть персональный верстак, где сотрудники могут просматривать свои задачи и карточки и самостоятельно управлять статусом карточек задач. Под рабочим местом сотрудники могут заполнять свое рабочее время и просматривать свои еженедельные и ежемесячные отчеты. Модуль служебной аттестации является подмодулем модуля управления персоналом, который генерирует три ключевые данные: объем кода, завершение работы и скорость выполнения работы на основе информации, сообщаемой персоналом в системе. и руководитель проекта должен оценить способность к обучению и технические способности персонала на основе их обычной работы в системе. Эти индикаторы используются для создания дерева решений по оценке эффективности. Система требует, чтобы руководитель проекта дал окончательную оценку служебной аттестации сотрудника. После того, как необработанные данные доступны, система создает дерево решений, связанное с оценкой производительности, на основе набора данных, которое помогает сотруднику понять области, которые необходимо улучшить. Он будет определять заработную плату работника. система генерирует дерево решений, связанное с оценкой эффективности, на основе набора данных, которое помогает сотруднику понять области, которые необходимо улучшить. Он будет определять заработную плату работника. система генерирует дерево решений, связанное с оценкой эффективности, на основе набора данных, которое помогает сотруднику понять области, которые необходимо улучшить. Он будет определять заработную плату работника.

Заключение. В данной статье, с точки зрения управления проектами, алгоритм дерева решений C4.5 используется для анализа оценки производительности. Собирается и обрабатывается информация, связанная с производительностью руководителей и сотрудников проектов R&D программного обеспечения, для формирования набора данных о производительности, а затем генерируем модель дерева решений, связанную с оценкой производительности, на основе этого набора данных посредством повторной обработки данных, разделения атрибутов, построения модели, операция обрезки и оценочный анализ. Модель дерева решений была протестирована с тестовым набором данных, сгенерированным системой, уровень точности достиг более 90%, что выше, чем результат дерева решений алгоритма ID3. На основе анализа дерева решений, можно определить области, которые необходимо улучшить в работе по разработке программного обеспечения, и

предоставить ссылку для оценки эффективности менеджеров проектов. С другой стороны, информация об управлении проектами и оценка эффективности сотрудников в системе будет оказывать влияние на стоимость компании. На основе полученной информации для компании могут быть созданы отчеты о затратах. Отчеты визуализируются в многомерном виде, чтобы показать стоимость компании. Отчеты могут использоваться руководителями проектов и соответствующими руководителями компаний для четкого понимания деятельности компании, и могут быть использованы для руководства при следующем планировании компании. Статья основана на Vue.js, облегченной среде MVVM, и использует язык C#, базу данных SQL Server и другие инструменты для проектирования системы.

Система основана на C4.5 алгоритме дерева решений для сбора и анализа набора данных, сгенерированного системой, создания деревьев решений, связанных с оценкой производительности, использования Echarts и других инструментов визуализации для создания соответствующих отчетов о затратах. Система разработана в архитектуре B/S, а система управления проектами R&D и платформы, которые могут выполнять анализ оценки эффективности, построены с помощью инструментов визуализации, алгоритма дерева решений и динамических веб-страниц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
2. Штовба Д.С. Муравьиные алгоритмы: теория и применение // Математика в приложениях. – 2004. – С. 70-75.
3. Борознов В.О. Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник Астраханского государственного технического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – С. 147-151.
4. Курейчик В.М., Курейчик В.В. Генетический алгоритм разбиения графа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – № 4. – С. 79-87.
5. Wang W., Liu L., Liu J., and Chen Z. Energy management and optimization of vehicle-to-grid systems for wind power integration // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2020. – Vol. 7, No. 1. – P. 172-180.
6. Wu W., Wu W., and Wang S. Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 121. – P. 967-977.
7. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.К. Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с. – ISBN 5-9221-0749-6.
8. Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Кравченко Ю.А. Роевой алгоритм поисковой оптимизации на основе моделирования поведения летучих мышей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 7 (180). – С. 53-62.
9. Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И. Модели параллелизма эволюционных вычислений // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (43). – С. 93-97.
10. Бова В.В., Курейчик В.В. Интегрированная подсистема гибридного и комбинированного поиска в задачах проектирования и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 37-42.
11. Кривенко М.П., Семенова М.М., Семенов В.А. Разработка принципов интеллектуального принятия решений на основе биоинспирированной оптимизации // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции, Таганрог, 05–10 октября 2020 года. – Таганрог: ЮФУ, 2020. – С. 100-106.
12. Al-Falahi M.D.A., Nimma K.S., Jayasinghe S.D.G., Enshaei H., and Guerrero J.M. Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 172. – P. 50-66.

13. Bourbon R., Ngueveu S.U., Roboam X., Sareni B., Turpin C., and Hernandez-Torres D. Energy management optimization of a smart wind power plant comparing heuristic and linear programming methods // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2019. – Vol. 158. – P. 418-431.
14. Bray M., Wang W., Rees M.A. et al. KPDGUI: an interactive application for optimization and management of a virtual kidney paired donation program // *Computers in Biology and Medicine*. – 2019. – Vol. 108. – P. 345-353.
15. Byrne R.H., Nguyen T.A., Copp D.A., Chalamala B.R., and Gyuk I. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems // *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13231–13260, 2018.
16. Kursitys I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A. A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing // *Advances in Intelligent Systems and Computing* (см. в книгах). – 2021. – Vol. 1197 AISC. – P. 1491-1498.
17. Kuliev E.V., Zaporozhets D.Y., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Wolf pack algorithm for solving vlsi design tasks // *Journal of Physics: Conference Series*. Сер. "International Conference "Information Technologies in Business and Industry" - 1 - Microprocessor Devices, Telecommunication and Networking" 2019. С. 022009.
18. Kuliev E.V., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Decision making in VLSI components placement problem based on grey wolf optimization // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019. – 2019. – P. 8884371
19. Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Курейчик В.В. Модель адаптивного поведения "обезьян" для решения задачи компоновки блоков ЭВА // *Информатизация и связь*. – 2018. – № 4. – С. 31-37.
20. Kuliev E., Kureichik V., Kureichik V. Monkey search algorithm for ece components partitioning // *Journal of Physics: Conference Series*. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems. – 2018. – P. 042026.
21. Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Development of distributed information systems: ontological approach // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2015. – Vol. 349. – P. 113-122.

REFERENCES

1. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [Theory of evolutionary calculations]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
2. Shtovba D.S. Murav'inye algoritmy: teoriya i primeneniye [Ant algorithms: theory and application], *Matematika v prilozheniyakh* [Mathematics in applications], 2004, pp. 70-75.
3. Boroznov V.O. Issledovaniye resheniya zadachi kommivoyazhera [Investigation of the solution of the traveling salesman problem], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Management, computer engineering and computer science], 2009, pp. 147-151.
4. Kureychik V.M., Kureychik V.V. Geneticheskii algoritm razbiveniya grafa [Genetic algorithm of graph partitioning], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 1999, No. 4, pp. 79-87.
5. Wang W., Liu L., Liu J., and Chen Z. Energy management and optimization of vehicle-to-grid systems for wind power integration, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, Vol. 7, No. 1, pp. 172-180.
6. Wu W., Wu W., and Wang S. Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, Vol. 121, pp. 967-977.
7. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.K. Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika [Search adaptation: theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p. ISBN 5-9221-0749-6.
8. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Kravchenko Yu.A. Royevoy algoritm poiskovoy optimizatsii na osnove modelirovaniya povedeniya letuchikh myshey [Swarm search engine optimization algorithm based on bat behavior modeling], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 7 (180), pp. 53-62.
9. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Modeli parallelizma evolyutsionnykh vychisleniy [Models of parallelism of evolutionary computations], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2011, No. 3 (43), pp. 93-97.

10. Bova V.V., Kureychik V.V. Integrirovannaya podsystema gibridnogo i kombinirovannogo poiska v zadachakh proyektirovaniya i upravleniya // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 37-42.
11. Krivenko M.P., Semenova M.M., Semenov V.A. Razrabotka printsiptov intellektual'nogo prinyatiya resheniy na osnove bioinspirirovannoy optimizatsii [Development of the principles of intelligent decision-making based on bioinspired optimization], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Taganrog, 05–10 oktyabrya 2020 goda* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020: Materials of the X International Scientific and Technical Conference, Taganrog, October 05-10, 2020]. Taganrog: Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2020, pp. 100-106.
12. Al-Falahi M.D.A., Nimma K.S., Jayasinghe S.D.G., Enshaei H., and Guerrero J.M. Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries, *Energy Conversion and Management*, 2018, Vol. 172, pp. 50-66.
13. Bourbon R., Ngueveu S.U., Roboam X., Sareni B., Turpin C., and Hernandez-Torres D. Energy management optimization of a smart wind power plant comparing heuristic and linear programming methods, *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, Vol. 158, pp. 418-431.
14. Bray M., Wang W., Rees M.A. et al. KPDGUI: an interactive application for optimization and management of a virtual kidney paired donation program, *Computers in Biology and Medicine*, 2019, Vol. 108, pp. 345-353.
15. Byrne R.H., Nguyen T.A., Copp D.A., Chalamala B.R., and Gyuk I. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 13231-13260.
16. Kursitys I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A. A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing, *Advances in Intelligent Systems and Computing (sm. v knigakh)*, 2021, Vol. 1197 AISC, pp. 1491-1498.
17. Kuliev E.V., Zaporozhets D.Y., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Wolf pack algorithm for solving vlsi design tasks, *Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference "Information Technologies in Business and Industry" - I - Microprocessor Devices, Telecommunication and Networking" 2019*, pp. 022009.
18. Kuliev E.V., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Decision making in VLSI components placement problem based on grey wolf optimization, *2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019*, 2019, pp. 8884371
19. Kureychik V.V., Kuliyeu E.V., Kureychik V.V. Model' adaptivnogo povedeniya "obez'yan" dlya resheniya zadachi komponovki blokov EVA [Model of adaptive behavior of "monkeys" for solving the problem of EVA block layout], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication]*, 2018, No. 4, pp. 31-37.
20. Kuliev E., Kureichik V., Kureichik V. Monkey search algorithm for ece components partitioning, *Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems*, 2018, pp. 042026.
21. Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Development of distributed information systems: ontological approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 349, pp. 113-122.

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

Кулиев Эльмар Валерьевич – Южный федеральный университет; e-mail: ekuliev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Семенов Виктор Алексеевич – e-mail: viksemenov@sfedu.ru; тел.: 88634371651; студент.

Котельва Ангелина Васильевна – e-mail: kotelva@sfedu.ru; тел.: 88634371651; студент

Игнатьева Сабина Валерьевна - e-mail: signateva@sfedu.ru; тел.: 88634371651; студент

Kuliev Elmar Valerievich – Southern Federal University; e-mail: ekuliev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Semenov Viktor Alekseevich – e-mail: visemenov@sfedu.ru; phone: 78634371651; student.

Kotelva Angelina Vasilevna – e-mail: kotelva@sfedu.ru; phone: 88634371651; student

Ignateva Sabina Valerievna - e-mail: signateva@sfedu.ru; phone: 88634371651; student.

Е.С. Подоплелова

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПСИХИАТРИИ

Использование методов искусственного интеллекта в области медицины получило широкое распространение, помогая диагностировать, анализировать и давать рекомендации по лечению. Психиатрия – это область медицины, изучающая психические расстройства, методы их диагностики и лечения. В спектр ее задач входит не только диагностика и лечение, но также наблюдение, мониторинг и последующая реабилитация пациентов. Эта предметная область имеет существенные проблемы, такие как объективность, противоречивость диагноза, сложность классификации болезней, непредсказуемость течения заболевания. С рядом этих проблем помогает справиться использование методов машинного обучения и алгоритмы искусственного интеллекта. Данная работа посвящена обзору исследований методов искусственного интеллекта, применяемых для решения задач в области психиатрии. Актуальность темы обусловлена высокой потребностью данной предметной области в улучшениях. Конкретные проблемы представлены в данной статье. Среди них были выделены основные направления: деидентификация данных, классификация тяжести симптомов, точность прогнозирования состояния. Для их решения авторами были применены такие методы как латентный семантический анализ для обработки естественного языка, методы классификации, сверточные нейронные сети для прогнозирования, когнитивное моделирование. Отдельно отмечена эффективность гибридных систем, включающих реализацию сразу нескольких методов машинного обучения. Целью исследования было выделить основные направления развития исследований научного сообщества, которые демонстрируют успешную интеграцию искусственного интеллекта в психиатрию, а также сравнение их между собой по полученным оценкам точности моделей. Что, в свою очередь, подразумевает разбор и анализ конкретных алгоритмов, их производительность для конкретных задач.

Методы искусственного интеллекта; латентный семантический анализ; обработка естественного языка; сверточные нейронные сети; гибридные системы.

E.S. Podoplelova

ANALYSIS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS APPLIED TO SOLVING PSYCHIATRY PROBLEMS

The use of artificial intelligence methods in the field of medicine has become widespread, helping to diagnose, analyze and make recommendations for treatment. Psychiatry is a branch of medicine that studies mental disorders, methods for their diagnosis and treatment. Her range of tasks includes not only diagnosis and treatment, but also observation, monitoring and subsequent rehabilitation of patients. This subject area has significant problems, such as objectivity, inconsistency in the diagnosis, the complexity of the classification of diseases, and the unpredictability of the course of the disease. With a number of these problems, the use of machine learning methods and artificial intelligence algorithms helps to cope. This paper is devoted to a review of research on artificial intelligence methods used to solve problems in the field of psychiatry. The relevance of the topic is due to the high need for improvements in this subject area. Specific issues are presented in this article. Among them, the main directions were identified: data de-identification, classification of symptom severity, accuracy of condition prediction. To solve them, the authors used such methods as latent semantic analysis for natural language processing, classification methods, convolutional neural networks for prediction, and cognitive modeling. Separately, the effectiveness of hybrid systems, including the implementation of several machine learning methods at once, is noted. The aim of the study was to highlight the main directions of development of research in the scientific community, which demonstrate the successful integration of arti-

ficial intelligence into psychiatry, as well as to compare them with each other according to the obtained estimates of the accuracy of the models. Which, in turn, implies the analysis and analysis of specific algorithms, their performance for specific tasks.

Artificial intelligence methods; latent semantic analysis; natural language processing; convolutional neural networks; hybrid systems.

Введение. В нынешнее время отмечается повышение значимости психиатрии с развитием нейронаук [1], и общим техническим прогрессом. Авторы описывают современные исследования в этой области, раскрывая тем самым вектор дальнейшего развития психиатрии и проблемы, с которыми она сейчас сталкивается. Одна из них – невозможность использования универсального метода диагностики и лечения, авторы выделяют необходимость «индивидуализации» психиатрии для каждой болезни с учетом особенностей конкретного больного.

Задача исследований в области искусственного интеллекта – помочь решить эти проблемы, повысить качество результатов и продвинуть эту область в развитии, как это было сделано в других сферах медицины, где уже были внедрены и применены методы ИИ как в исследованиях, так и на практике. Поэтому, в этой статье представлен обзор ряда исследований, в которых используются методы искусственного интеллекта для исследований в области психиатрии.

Использование методов обработки естественного языка для клинических записей. Одной из важных проблем развития ИИ в психиатрии является сложность обработки клинических записей. Их форма отличается от обычных структурированных данных, включающих физиологические параметры, результаты лабораторных тестов (золотой стандарт) и т.п. Из-за этого невозможно применить методы и алгоритмы, которые уже применяются для работы с медицинскими записями.

Второй важный аспект – конфиденциальность. Данные о психическом здоровье людей сильно ограничены в распространении. Единственный выход – деидентификация этих записей.

Масштабное исследование [2] посвящено трем основным направлениям направлениям:

1) Деидентификация – обезличивание клинических записей для возможности использования исследовательским сообществом [3–8].

2) Классификация тяжести симптомов – цель состояла в том, чтобы определить тяжесть симптомов у пациента с использованием порядковой шкалы от 0 до 3 в рамках RDoC (Research Domains Criteria – критерии области исследований) на основе информации, включенной в первоначальную психиатрическую оценку пациента. Эта задача представляет собой первую попытку классифицировать записи о психическом здоровье по порядковой шкале с использованием обработки естественного языка [9].

3) Новое использование данных – представление новых данных для других исследовательских задач.

Задачу деидентификации разбили на два этапа. На первом в системах прогонялись новые данные без каких-либо изменений в параметрах. Результаты этой подзадачи предоставили информацию о том, можно ли точно деидентифицировать новые данные на основе существующих моделей. Самая производительная система для этой подзадачи получила оценку F1 **0,7985**, что свидетельствует о том, что готовые решения не дают надежных результатов на новых данных, но обеспечивают хороший старт для построения моделей, которые можно настроить для новых данных с реальными данными и независимо от них хорошо работать в своих целевых приложениях.

Второй этап длился два месяца, за которые системы и методы настраивались вручную. Почти все команды в этой подзадаче использовали гибридные системы различных алгоритмов, обучая каждый компонент конкретному подмножеству частной медицинской информации (PHI), а затем объединяли выходные данные всех компонентов, чтобы охватить всю PHI. Некоторые команды использовали комбинации условных случайных полей (CRF) [3, 17], каждое из которых было обучено для разных подмножеств PHI, например, используя одну CRF для выявления шаблонов в датах, телефонных номерах и другой PHI со стандартизированными буквенно-цифровыми шаблонами, а другую CRF для текстовой PHI, такой как имена и локация [5, 6]. Другие использовали комбинации CRF и двунаправленных систем долговременной кратковременной памяти (BI-LSTM) [7, 8]. Другая команда использовала систему «многопроходного сита», при этом различные сита фокусировались на сопоставлении с образцом, сопоставлении по словарю или CRF [3]. В целом, эти гибридные системы оказались в значительной степени эффективными, самый высокий результат с оценкой F1 **0,9422** [7].

Задача второго этапа [2, 9] была сосредоточена на прогнозировании тяжести симптомов в области положительной валентности структуры RDoC. Данные, используемые для этой задачи: 1000 записей о первоначальном психиатрическом обследовании. Профессиональные психиатры маркировали записи с определенным уровнем тяжести симптомов: отсутствующие, легкие, умеренные и тяжелые. Самая высокоэффективная система получила официальный рейтинговый балл **0,863019**, что близко к уровню производительности, зарегистрированному для наименее опытного психиатра среди аннотаторов.

Результаты этого направления определяют классификацию задачи по тяжести симптомов как эффективно выполнимую в разряде подходов, основанных на данных, хотя пространство для улучшения все еще остается. Были выявлены два сложных для обработки класса записей: записи с очень небольшим количеством важных сигналов положительной валентности, и записи, описывающие пациентов, на которых преимущественно воздействовала отрицательная, а не положительная валентность.[9]

Третья задача посвящена представлению медицинских данных RDoC для иных задач. Ввиду нехватки наборов записей о психическом здоровье, целью было пополнить базу этих данных.

Подробности о методах и алгоритмах, реализованных для решения вышеописанных задач будут описаны в будущих.

Обработка естественного языка для предсказания развития психоза на ранней стадии. Авторы работы [10] в своем исследовании использовали обработку естественного языка и машинное обучение для классификации полученных результатов. Целью исследования было предсказание позднего развития психоза у подростков из группы высокого клинического риска (CHR). Для диагностики и установления статуса высокого риска авторы использовали структурированное интервью для продромальных синдромов / шкалы продромальных симптомов (SIPS / SOPS). Эта шкала была выбрана для оценки исходных и квартальных симптомов, а также для определения исхода психоза. SIPS / SOPS оценивает положительные (подпороговые психотические), отрицательные, дезорганизованные и общие симптомы.

Все участники CHR в этом исследовании соответствовали критериям синдрома ослабленных положительных симптомов. Обученные ассистенты-исследователи, имеющие степень магистра проводили SIPS / SOPS с клиническими оценками, полученными на основе консенсуса экспертов. Участники проспективно обследовались на предмет наличия симптомов каждые 3 месяца в течение до 2,5 лет.

Стенограммы интервью были предварительно обработаны с использованием набора инструментов для естественного языка (NLTK)[16]. После исключения знаков препинания каждое интервью автоматически разбивалось на фразы. Затем слова были преобразованы в корни, от которых они образованы, или лемматизированы, с помощью лемматизатора NLTK WordNet.

Полученные в результате предварительно обработанные данные состояли из списка лемматизированных слов, разбитых на фразы, сохраняя исходный порядок, без знаков препинания и в нижнем регистре.

Для семантического анализа авторы использовали скрытый семантический анализ – LSA (Latent Semantic Analysis). Это многомерная ассоциативная модель, основанная на предположении, что значение слова является функцией отношения каждого слова к любому другому слову. Если семантически похожие слова встречаются в текстах с согласованной тематикой чаще, чем несвязанные слова, то семантическое сходство двух слов можно количественно проиндексировать по частоте их совместного появления в достаточно большом корпусе текстов. Таким образом, LSA фиксирует значение слов через линейные представления в многомерном (300–400 мерном) семантическом пространстве на основе частот совместной встречаемости слов.

Каждому слову в лексике назначается вектор, представляющий его семантическое содержание; ориентация этих векторов может быть использована для сравнения семантического сходства между словами.

Здесь LSA прошла обучение на базе Touchstone Applied Science Associates (TASA) Corpus - коллекции учебных материалов, собранных TASA. Разработанная авторами мера семантической когерентности аналогична той, что использовалась в работе [11] Она проводила различие между установленными пациентами с шизофренией и контрольной группой. Настоящая мера отличается от более раннего подхода тем, что она явно включает синтаксическую информацию: семантические траектории представлены сходством между парами последовательных фраз или парами фраз, разделенными промежуточной фразой (см. Рисунок 1). Учитывая транскрипцию речи D, документ разбивается на n фраз S_i и преобразуется в векторное представление путем замены каждого слова во фразе соответствующим ему вектором. Затем, векторы фраз суммируются, принимая среднее значение их составных частей:

$$L_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{ik}, \quad (1)$$

т.е. среднее значение всех векторов LSA каждого слова во фразе.

Далее определялась когерентность первого порядка, взяв подобие последовательных векторов фраз, усредненное по всем фразам в тексте (обозначено $h: i$ ниже):

$$FOC = \langle \cos(L_i, L_{i+1}) \rangle \quad (2)$$

и связность второго порядка, взяв сходство между фразами, разделенными другой промежуточной фразой, усредненное по всем фразам в тексте:

$$SOC = \langle \cos(L_i, L_{i+2}) \rangle. \quad (3)$$

С помощью этих двух функций авторы исследования смогли охарактеризовать семантическую согласованность путем измерения компонентов распределений когерентности первого и второго порядка по выборкам речи, включая такие характеристики, как минимум, среднее значение, медиана и стандартное отклонение.

Таким образом, была проиндексирована связность речи с помощью:

- 1) автоматического разделения интервью по фразам;
- 2) присвоение семантических векторов фраз как среднее значение семантических векторов LSA для каждого слова во фразе;
- 3) оценка семантического сходства (т. е. косинуса) между векторами фраз последовательных фраз или фразами, разделенными другой промежуточной фразой.



Рис. 1. Модель для работы с текстом

В дополнение к семантическому анализу авторы определили еще одну меру обработки документов на основе тегов Part Of Speech[18] (POS-Tag). Он состоит из обозначения каждого слова его грамматической функцией.

Например, предложение «Кот под столом» помечается процедурой POS-Tag как ('The', 'DT'), ('cat', 'NN'), ('is', 'VBZ '), (' под ', 'IN '), (' the ', 'DT '), (' table ', 'NN ')), где DT - это тег для определителей, NN для существительных, VBZ для глаголов и IN для предлогов. Для каждой расшифровки они рассчитали информацию POS-Tag (с помощью NLTK)[14, 18, 19] и использовали частоту каждого тега в качестве дополнительного атрибута текста. Автоматизация тегов использует помеченный вручную корпус для обучения процессу синтаксического анализа с использованием различных эвристик. NLTK использует модель под названием Pen Tree Bank [14, 15].

Результат исследования показал 100% точность предсказания позднего психоза, однако, выборка по словам автора является маленькой. Необходимо провести тестирование этого метода на крупных объемах данных[12].

Использование сверточной нейронной сети для прогнозирования психических заболеваний у детей. В следующей работе [13] авторы используют модель прогнозирования на ранних стадиях ментальных заболеваний у детей. В предлагаемой модели сверточные нейронные сети (CNN) сначала создаются для изучения особенностей поведенческих данных пациента. Использование встроенных семантических, математических методов позволяет получить представление о нарушениях, эффективную классификацию и прогноз. Цель исследования – использование методов ИИ для улучшения качества оказания помощи, путем ранней диагностики. Работа посвящена очередной попытке когнитивного моделирования, так как проблема переноса мышления человека на алгоритмы машины до сих пор не решена. В данном случае цель исследования – разработка модели, которая может выявлять проблемы с психическим здоровьем у детей.

Искусственный интеллект и машинное обучение или глубокое обучение преобразуют данные с помощью уровней нелинейных вычислительных модулей, что дает возможность работать с динамическими данными и получать из них знания. Машинное обучение эффективно направлено на разработку статистических моделей или вычислительных алгоритмов, которые могут автоматически предполагать скрытые закономерности из данных. Модель сверточной нейронной сети была выбрана для лучшего анализа и обозначения информации о психологических особенностях текста. На основе модельного словаря оценивается способность каждого слова дифференцировать психическое здоровье детей, а сверточная нейронная сеть направляется для извлечения более актуальных психологических характеристик из сообщений, а также обучается модель автоматической оценки психического здоровья.

В этой статье предполагается, что модифицированная сверточная нейронная сеть классифицирует поведенческие данные о психическом здоровье детей. Входными данными является текстовый документ, в котором каждое слово $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ обозначено соответствующими индексами в словаре U . Слова преобразовываются в векторы слов с помощью матриц вложения – $P \in R^{|U| \times c}$ для создания матрицы документа $C \in R^{m \times c}$, где c – векторы изображения размерности слова.

$$C = \begin{pmatrix} P s_1 \\ P s_2 \\ \dots \\ P s_m \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Дальнейшие расчёты для нейросети приведены подробно в самой работе. В качестве способов для сравнения прогнозов с их фактическим влиянием были выбраны средняя абсолютная ошибка (MASE) и средний квадрат ошибки. Они суммируют свой результат таким образом, чтобы игнорировать направление завышенного или заниженного прогноза. Эффективность распознавания тяжести депрессии оценивается с помощью среднеквадратичной ошибки (RMSE) и средней абсолютной ошибки (MAE) между прогнозами.

Новые исследовательские методы CNN на основе искусственного интеллекта, включая иммерсивную и смешанную реальность, а также машинный анализ прогнозных выражений могут использоваться для улавливания чувств субъектов, погруженных в моделирование с более высокой чувствительностью и коэффициентами F-Measure. В дополнение к традиционным подходам важны методы медицинского анализа. Численные результаты показывают, что предлагаемый метод имеет высокий уровень чувствительности 97,9%, уровень специфичности 96,7%, коэффициент отзыва 95,6%, коэффициент точности 90,1% F-меры 95,6% и меньшую частоту ошибок 9,2%, чем другие существующие методы. В будущей работе авторы обещают более мощные регрессионные модели для дальнейшего повышения точности прогнозов тревожности или депрессии.

В качестве итогового результата исследования представлена таблица методов искусственного интеллекта, которые показали наилучшие результаты для решения задач, выделенных в начале статьи.

Таблица 1

Сводные результаты анализа алгоритмов

Методы	Задача	Результаты	Примечания
NLP	Деидентификация клинических записей	F1: 0.7985 (без модификации) F1: 0.9422 (после модификации)	Токенизация была выполнена 2 методами: HIT-DEID (CRF)[17] BI-LSTM[20]
Ensemble of Support Vector Machine with RBF kernel, Random Forest, Multinomial Naive Bayes, Adaboost, Deep Neural Network	Классификация по тяжести симптомов	MAE: 0.8602	

LSA, Логистическая регрессия	Прогнозирование	83% в прогнозировании начала психоза (внутри-протокольный), перекрестно подтвержденная точность 79% предсказания начала психоза в исходной когорте риска (перекрестный протокол) 72% точность в различении речи пациентов с недавно начавшимся психозом от речи здоровых людей.	
CNN	Прогнозирование	F-measure: 95,6%	

Заключение. В результате данного исследования можно сделать вывод, что использование искусственного интеллекта способно улучшить сферу психиатрии по определенным критериям:

- ◆ повысить объективность клинических результатов;
- ◆ выявление скрытых связей;
- ◆ обработка большего количества информации;
- ◆ повысить точность диагноза;
- ◆ возможность прогнозирования развития болезни (либо конкретных симптомов);
- ◆ преодолеть проблему конфиденциальности клинических данных, способствующую застою в исследованиях.

Исследование вышеописанных методов демонстрирует новый, комплексный подход к решению определённого ряда задач на примере психиатрии. Совокупность выделенных методов позволяет создать гибридную систему искусственного интеллекта, способную:

- а) деидентифицировать записи;
- б) классифицировать записи (пациентов) по тяжести симптомов;
- в) прогнозировать развитие заболевания.

Реализация всех трех этапов в одной системе позволит комплексно подойти к улучшению качества оказания помощи, в отличие от исследований, посвященных одной обособленной задаче. Здесь же были проанализированы и выделены наилучшие методы, которые показали высокую точность в каждом из своих направлений.

В перспективе, выявление скрытых когнитивных связей или же напротив, нарушение структуры мышления возможно реализовать через когнитивные методы – например, построением когнитивных карт, однако, автоматизация этого процесса, а также получение точных результатов в данный момент является целью будущих исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макушкин Е.В., Осколкова С.Н. и Фастовцов Г.А. Психиатрия будущего: многоаспектность проблем современной психиатрии и разработка новых классификационных систем // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – М.: Медиа Сфера, 2017.
2. Uzuner O., Stubbs A., Filannino M. A Natural Language Processing Challenge for Clinical Records: Research Domains Criteria (RDoC) for Psychiatry // Journal of Biomedical Informatics. – 2017. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.10.005.

3. *Liu Z., Tang B., Wang X., Chen Q.* De-identification of clinical notes via recurrent neural network and conditional random field // *Journal of Biomedical Informatics*. – 2017. – P. 34-42. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.05.023.
4. *Stubbs A., Filannino M., Uzuner Ö.* De-identification of psychiatric intake records: Overview of 2016 CEGS N-GRID shared tasks Track 1 // *Journal of Biomedical Informatics*. – 2017. – P. 4-18. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.06.011.
5. *Lee H.J., Wu Y., Zhang Y., Xu J., Xu H., Roberts K.* A hybrid approach to automatic de-identification of psychiatric notes // *Journal of Biomedical Informatics*. – 2017. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.06.006.
6. *Azad Dehghan, Aleksandar Kovacevic, George Karystianis, John A Keane, and Goran Nenadic.* Learning to identify Protected Health Information by integrating knowledge- and data-driven algorithms: A case study on psychiatric evaluation notes // *J Biomed Inform.* – 2017. – 75S. – P. 28-33.
7. *Liu Z., Tang B., Wang X., Chen Q.* De-identification of clinical notes via recurrent neural network and conditional random field // *J Biomed Inform.* – 2017. – 75S. – P. 34-42. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.05.023.
8. *Jiang Z., Zhao C., He B., Guan Y., Jiang J.* De-identification of medical records using conditional random fields and long short-term memory networks // *J Biomed Inform.* – 2017. – 75S. – P. 43-53. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.10.003.
9. *Filannino, Michele, Stubbs, Amber, Uzuner, Ozlem.* Symptom severity prediction from neuropsychiatric clinical records: Overview of 2016 CEGS N-GRID shared tasks Track 2. This issue // *Journal of Biomedical Informatics*. – 2017 November. – 75 Suppl: S62-S70. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.04.017.
10. *Bedi G., Carrillo F., Cecchi G. et al.* Automated analysis of free speech predicts psychosis onset in high-risk youths // *npj Schizophr.* – 2015. – Vol. 1, 15030. – <https://doi.org/10.1038/npjpsz.2015.30>.
11. *Elvevag B., Foltz P.W., Weinberger D.R., Goldberg T.E.* Quantifying incoherence in speech: an automated methodology and novel application to schizophrenia // *Schizophr Res.* – 2007. – Numb. 93. – P. 304-316.
12. *Landauer T.K., Dumais S.T.* A solution to Plato's problem: the latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge // *Psychol Rev.* – 1997. – Vol. 104. – P. 211-240.
13. *Zhang X., Wang R., Sharma A., et al.* Artificial intelligence in cognitive psychology – Influence of literature based on artificial intelligence on children's mental disorders // *Aggression and Violent Behavior*. – 2021. – <https://doi.org/10.1016/j.avb.2021.101590>This.
14. *Bird S., Klein E., Loper E.* *Natural Language Processing with Python* // O'Reilly Media: Sebastopol. – USA, 2009.
15. *Panjabi S.* Language modelling with Penn Treebank. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/language-modelling-with-penn-treebank-64786f641f6> (дата обращения: 18.03.2022).
16. *Natural Language Toolkit.* – Режим доступа: <http://www.nltk.org/> (дата обращения: 10.02.2022)
17. *Sutton C., McCallum A.* An Introduction to Conditional Random Fields // *Foundations and Trends in Machine Learning*. – Vol. 4, No. 4. – P. 267-373. – <http://dx.doi.org/10.1561/2200000013>.
18. *Complete Tutorial on Parts Of Speech (PoS) Tagging.* – Режим доступа: <https://analyticsindiamag.com/complete-tutorial-on-parts-of-speech-pos-tagging/> (дата обращения: 1.01.2022).
19. *NLP | Part of speech tagged – word corpus.* – Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/nlp-part-of-speech-tagged-word-corpus/> (дата обращения: 11.02.2022).
20. *Jang B., Kim M., Harerimana G., Kang S-u, Kim J.W.* Bi-LSTM Model to Increase Accuracy in Text Classification: Combining Word2vec CNN and Attention Mechanism // *Applied Sciences*. – 2020; 10(17):5841. – <https://doi.org/10.3390/app10175841>.

REFERENCES

1. *Makushkin E.V., Oskolkova S.N. i Fastovtsov G.A.* Psikhatriya budushchego: mnogoaspektnost' problem sovremennoy psikhatrii i razrabotka novykh klassifikatsionnykh sistem [Psychiatry of the future: the multidimensionality of the problems of modern psychiatry and the development of new classification systems], *Zhurnal nevrologii i psikhatrii im. S.S. Korsakova* [Journal of Neurology and Psychiatry. S.S. Korsakov]. Moscow: Media Sfera, 2017.
2. *Uzuner O., Stubbs A., Filannino M.* A Natural Language Processing Challenge for Clinical Records: Research Domains Criteria (RDoC) for Psychiatry, *Journal of Biomedical Informatics*, 2017. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.10.005.
3. *Liu Z., Tang B., Wang X., Chen Q.* De-identification of clinical notes via recurrent neural network and conditional random field, *Journal of Biomedical Informatics*, 2017, pp. 34-42. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.05.023.
4. *Stubbs A., Filannino M., Uzuner Ö.* De-identification of psychiatric intake records: Overview of 2016 CEGS N-GRID shared tasks Track 1, *Journal of Biomedical Informatics*, 2017, pp. 4-18. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.06.011.
5. *Lee H.J., Wu Y., Zhang Y., Xu J., Xu H., Roberts K.* A hybrid approach to automatic de-identification of psychiatric notes, *Journal of Biomedical Informatics*, 2017. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.06.006.
6. *Azad Dehghan, Aleksandar Kovacevic, George Karystianis, John A Keane, and Goran Nenadic.* Learning to identify Protected Health Information by integrating knowledge- and data-driven algorithms: A case study on psychiatric evaluation notes, *J Biomed Inform*, 2017, 75S, pp. 28-33.
7. *Liu Z., Tang B., Wang X., Chen Q.* De-identification of clinical notes via recurrent neural network and conditional random field, *J Biomed Inform*, 2017, 75S, pp. 34-42. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.05.023.
8. *Jiang Z., Zhao C., He B., Guan Y., Jiang J.* De-identification of medical records using conditional random fields and long short-term memory networks, *J Biomed Inform*, 2017, 75S, pp. 43-53. – DOI: 10.1016/j.jbi.2017.10.003.
9. *Filannino, Michele, Stubbs, Amber, Uzuner, Ozlem.* Symptom severity prediction from neuropsychiatric clinical records: Overview of 2016 CEGS N-GRID shared tasks Track 2. This issue, *Journal of Biomedical Informatics*, 2017 November, 75 Suppl: S62-S70. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.04.017.
10. *Bedi G., Carrillo F., Cecchi G. et al.* Automated analysis of free speech predicts psychosis onset in high-risk youths // *npj Schizophr.* – 2015. – Vol. 1, 15030. – <https://doi.org/10.1038/npjzsch.2015.30>.
11. *Elvevag B., Foltz P.W., Weinberger D.R., Goldberg T.E.* Quantifying incoherence in speech: an automated methodology and novel application to schizophrenia, *Schizophr Res.*, 2007, Numb. 93, pp. 304-316.
12. *Landauer T.K., Dumais S.T.* A solution to Plato's problem: the latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge, *Psychol Rev.*, 1997, Vol. 104, pp. 211-240.
13. *Zhang X., Wang R., Sharma A., et al.* Artificial intelligence in cognitive psychology – Influence of literature based on artificial intelligence on children's mental disorders, *Aggression and Violent Behavior*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.avb.2021.101590>This.
14. *Bird S., Klein E., Loper E.* Natural Language Processing with Python, *O'Reilly Media: Sebastopol*. USA, 2009.
15. *Panjabi S.* Language modelling with Penn Treebank. Available at: <https://towardsdatascience.com/language-modelling-with-penn-treebank-64786f641f6> (accessed 18 March 2022).
16. Natural Language Toolkit. Available at: <http://www.nltk.org/> (accessed 10 February 2022).
17. *Sutton C., McCallum A.* An Introduction to Conditional Random Fields, *Foundations and Trends in Machine Learning*, Vol. 4, No. 4, pp. 267-373. – <http://dx.doi.org/10.1561/2200000013>.
18. Complete Tutorial on Parts Of Speech (PoS) Tagging. Available at: <https://analyticsindiamag.com/complete-tutorial-on-parts-of-speech-pos-tagging/> (accessed 1 January 2022).

19. NLP | Part of speech tagged – word corpus. Available at: <https://www.geeksforgoeks.org/nlp-part-of-speech-tagged-word-corpus/> (accessed 11 February 2022).
20. Jang B., Kim M., Harerimana G., Kang S-u, Kim J.W. Bi-LSTM Model to Increase Accuracy in Text Classification: Combining Word2vec CNN and Attention Mechanism, *Applied Sciences*, 2020; 10(17):5841. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10175841>.

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

Подоплелова Елизавета Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: chuzhinova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525844188; аспирант.

Podoplelova Elizaveta Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: chuzhinova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525844188; postgraduate student.

УДК 004.8+004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-189-199

В.В. Курейчик, С.И. Родзин, В.В. Бова

МЕТОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ*

Представлен анализ подходов, основанных на глубоком обучении (DL), к задачам обработки естественного языка (NLP). Исследование охватывает различные задачи NLP, реализованные с помощью искусственных нейронных сетей (ANNs), сверточных нейронных сетей (CNNs) и рекуррентных нейронных сетей (RNNs). Эти архитектуры позволяют решать широкий спектр задач обработки естественного языка, ранее не поддававшихся эффективному решению: моделирование предложений, маркировка семантической роли, распознавание именованных сущностей, ответы на вопросы, категоризация текста, машинный перевод. Наряду с преимуществами использования CNN для решения задач NLP имеются проблемы, связанные с большим числом варьируемых параметров сети и выбором ее архитектуры. Мы предлагаем для оптимизации архитектур сверточных нейронных сетей эволюционный алгоритм. Алгоритм инициализирует случайную популяцию из малого числа агентов (не более 5) и с помощью фитнес функции получает оценки каждого агента в популяции. Затем проводится турнирная селекция между всеми агентами и применяется оператор кроссинговера между wybranными агентами. Алгоритм обладает таким преимуществом как малый размер популяции сетей, он использует несколько типов слоев CNN: сверточный слой, максимальный слой пулинга (субдискретизации), средний слой пулинга и полносвязный слой. Алгоритм тестировался на локальном компьютере с графическим процессором ASUS Cerberus GeForce® GTX 1050 Ti OC Edition 4 GB GDDR5, 8 GB оперативной памяти и процессором Intel(R) Core(TM) i5-4670. Результаты экспериментов показали, что предлагаемый нейроэволюционный подход способен достаточно быстро найти оптимизированную архитектуру CNN для заданного набора данных с приемлемым значением точности. Для завершения выполнения алгоритма потребовалось около 1 часа. Для создания и обучения CNN был использован популярный фреймворк TensorFlow. Для оценки алгоритма использовались общедоступные наборы данных: MNIST и MNIST-RB. Наборы содержали черно-белые изображения рукописных букв и цифр с 50000 обучающими образцами и 10000 тестовыми образцами.

Глубокое обучение; обработка естественного языка; нейронные сети; сверточные нейронные сети; рекурсивные нейронные сети; обучение представлению.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.

V.V. Kureichik, S.I. Rodzin, V.V. Bova

DEEP LEARNING METHODS FOR NATURAL LANGUAGE TEXT PROCESSING

The analysis of approaches based on deep learning (DL) to natural language processing (NLP) tasks is presented. The study covers various NLP tasks implemented using artificial neural networks (ANNs), convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs). These architectures allow solving a wide range of natural language processing tasks that previously could not be effectively solved: sentence modeling, semantic role labeling, named entity recognition, answers to questions, text categorization, machine translation. Along with the advantages of using CNN to solve NLP problems, there are problems associated with a large number of variable network parameters and the choice of its architecture. We propose an evolutionary algorithm for optimizing the architecture of convolutional neural networks. The algorithm initializes a random population of a small number of agents (no more than 5) and uses the fitness function to get estimates of each agent in the population. Then a tournament selection is carried out between all agents and a crossover operator is applied between the selected agents. The algorithm has such an advantage as the small size of the network population, it uses several types of CNN layers: convolutional layer, maximum pooling layer (subdiscretization), medium pooling layer and fully connected layer. The algorithm was tested on a local computer with an ASUS Cerberus GeForce® GTX 1050 Ti OC Edition 4 GB GDDR5, 8 GB of RAM and an Intel(R) Core(TM) i5-4670 processor. The experimental results showed that the proposed neuroevolutionary approach is able to quickly find an optimized CNN architecture for a given data set with an acceptable accuracy value. It took about 1 hour to complete the algorithm execution. The popular TensorFlow framework was used to create and train CNN. To evaluate the algorithm, public datasets were used: MNIST and MNIST-RB. The kits contained black-and-white images of handwritten letters and numbers with 50,000 training samples and 10,000 test samples.

Deep learning; natural language processing; neural networks; convolutional neural networks; recursive neural networks; representation learning.

Введение. Машинное обучение (*Machine Learning, ML*) – это класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение за счёт применения решений множества сходных задач. Различают обучение по прецедентам, основанное на выявлении эмпирических закономерностей в данных и дедуктивное обучение, предполагающее формализацию знаний экспертов и их перенос в компьютер в виде базы знаний. Дедуктивное обучение обычно относится к области экспертных систем. Поэтому термины машинное обучение и обучение по прецедентам можно считать синонимами.

Общая постановка задачи обучения по прецедентам заключается в следующем. Имеется множество объектов и множество возможных ответов. Существует некоторая зависимость между ответами и объектами, но она неизвестна. Известна только конечная совокупность прецедентов – пар «объект/ответ», называемая обучающей выборкой. На основе этих данных требуется восстановить неявную зависимость, то есть построить алгоритм, способный для любого возможного входного объекта выдать достаточно точный классифицирующий ответ. Эта зависимость не обязательно выражается аналитически, и здесь искусственные нейронные сети (*Artificial Neural Network, ANN*) реализуют принцип эмпирически формируемого решения. Важной особенностью при этом является способность обучаемой системы к обобщению, то есть к адекватному отклику на данные, выходящие за пределы имеющейся обучающей выборки. Для измерения точности ответов вводится оценочный функционал качества.

Данная постановка является обобщением классических задач аппроксимации функций. В классических задачах аппроксимации объектами являются действительные числа или векторы. В задачах обработки лингвистической информации входные данные являются текстовыми. Эти особенности приводят к большому

разнообразию методов глубокого обучения: с учителем, без учителя, с подкреплением. Методы глубокого обучения основаны на обучении представлениям, а не на специализированных алгоритмах под конкретные задачи. Эти методы были известны ещё в 1980-е годы, но результаты были невпечатляющими, пока продвижения в теории искусственных нейронных сетей и вычислительные мощности не позволили создавать сложные технологические архитектуры нейронных сетей, обладающие достаточной производительностью. Эти архитектуры позволили решать широкий спектр задач, ранее не поддававшихся эффективному решению, например, в компьютерном зрении, машинном переводе, распознавании речи и обработке естественного языка (*Natural Language Processing, NLP*), причём качество решения во многих случаях теперь сопоставимо, а в некоторых случаях превосходит эффективность человека.

Глубокое обучение (*Deep Learning, DL*) включает в себя несколько уровней обработки данных, которые позволяют машине учиться на данных с помощью различных уровней абстракции для конкретной задачи без вмешательства человека, или используя ранее полученные знания. Исследование пригодности подходов *DL* для задач *NLP* привлекло большое внимание со стороны исследовательских сообществ *ML* и *NLP* [1]. Были достигнуты неплохие результаты при решении различных задачах *NLP*, таких как моделирование предложений [2], маркировка семантической роли [3], распознавание именованных сущностей [4], ответы на вопросы [5], категоризация текста [6] и машинный перевод [7].

Проанализируем основные подходы *DL* и перспективы их применения для решения задач *NLP*.

Существующие подходы. *Глубокое обучение и искусственные нейронные сети. ANNs* не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ *ANN* перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения *ANN* способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искажённых данных. По характеру связей *ANN* делятся на два типа архитектур: сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети (*RNNs*). В архитектуре сети прямого распространения все связи направлены строго от входных нейронов к выходным. Напротив, в *RNN* сигнал с выходных нейронов или нейронов скрытого слоя частично передаётся обратно на входы нейронов входного слоя (обратная связь). Например, рекуррентная сеть Хопфилда «фильтрует» входные данные, возвращаясь к устойчивому состоянию и позволяет решать задачи компрессии данных и построения ассоциативной памяти.

ANNs, применяемые для решения задач *NLP*, рассматривают синтаксические особенности текста как часть семантического анализа [8]. В [9] были предложены новые модели обучения нейронных сетей, которые применялись к различным задачам обработки текста на естественном языке, таким как маркировка семантических ролей и распознавание именованных сущностей. Преимущество этих подходов состоит в том, что удалось избежать необходимости в предварительном обучении. Применение *ANN* позволило достигнуть высокой производительности при маркировке с использованием небольших вычислительных ресурсов [3]. В [2] предлагается динамическая сверточная нейронная сеть (*Dynamic Convolutional Neural Network, DCNN*) для решения задачи семантического моделирования предложений, которая включает в себя извлечение признаков из предложений. *DCNN*

обучается путем выборочного взвешивания функций между связанными слоями сети. В [10] был предложен подход для контроля качества изображений. Этот подход сочетает в себе *NLP* и представление изображений для текстовой системы ответов на вопросы, касающихся изображений. Однако эта система давала неверные ответы на вопросы относительно размера объектов на изображении, а также на вопросы, связанные с пространственным мышлением (“какой объект самый большой?”). В исследовании [11] был предложен новый подход для сопоставления запросов с возможными ответами (предложениями) в зависимости от их семантического значения. Этот подход использует глубокое обучение без необходимости привлечения лингвистических знаний. Отметим, что современные распределительные модели на основе нейронных сетей достигли высокой производительности при решении таких задач *NLP* как классификация документов [12], устранение неоднозначности и распознавание сущностей [9].

В исследовании [5] используется *RNN* в системе, способная отвечать на вопросы о параграфах. В [13] была предложена нейронная машина для генерации коротких текстовых диалогов. Модели *RNN* демонстрируют неплохую производительность при классификации различных мнений [12, 14] и ответах на вопросы [5]. Модель адаптивной *RNN* (*ADARNN*) для классификации различных мнений используется в рекламных акциях *Twitter* [15].

Другим подходом к решению задач *NLP* является модель *ANNABEL* [7]. Эта модель может обрабатывать вербальный и невербальный естественный язык без предварительных знаний.

Глубокое обучение и сверточные нейронные сети. Сверточные нейронные сети (*Convolutional Neural Network, CNN*) первоначально развивалась в области исследований машинного зрения. Первое применение *CNN* связано с задачами классификации изображений, обучения обнаружению краев изображения для идентификации таких объектов как лицо человека [16]. Идея *CNN* заключается в чередовании сверточных слоев и субдискретизирующих слоев. Структура сети – однонаправленная, принципиально многослойная. Название архитектура сети получила из-за наличия операции свертки, суть которой в том, что каждый фрагмент изображения умножается на матрицу (ядро) свертки поэлементно, а результат суммируется и записывается в аналогичную позицию выходного изображения. Работа *CNN* интерпретируется как переход от конкретных особенностей изображения к более абстрактным деталям, и далее к еще более абстрактным деталям вплоть до выделения понятий высокого уровня. При этом сеть самонастраивается и вырабатывает необходимую иерархию абстрактных признаков (последовательности карт признаков), фильтруя маловажные детали и выделяя существенное.

Подобная интерпретация носит скорее метафорический или иллюстративный характер. Фактически «признаки», вырабатываемые сложной *CNN*, малопонятны и трудны для интерпретации настолько, что на практике суть этих признаков даже не пытаются понять, тем более «подправлять», а вместо этого для улучшения результатов распознавания меняют структуру и архитектуру сети. Так, игнорирование системой каких-то существенных явлений может говорить о том, что либо не хватает данных для обучения, либо структура сети обладает недостатками, и система не может выработать эффективных признаков для данных явлений.

Типовая архитектура *CNN* представлена на рис. 1. Сеть состоит из большого количества слоев. После начального слоя (входного изображения) сигнал проходит серию сверточных слоев, в которых чередуется собственно свертка и субдискретизация (пулинг).

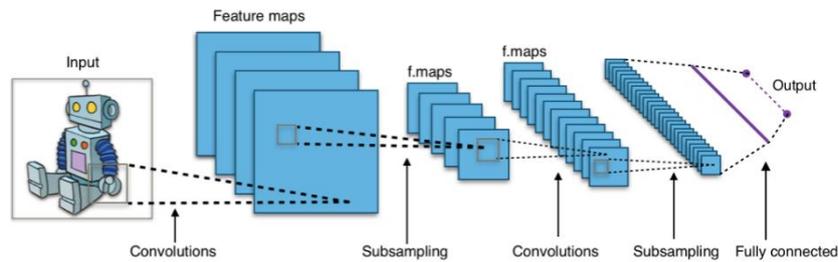


Рис. 1. Типовая архитектура CNN

Чередование слоев позволяет составлять «карты признаков» из карт признаков. На каждом следующем слое карта уменьшается в размере, но увеличивается количество каналов. На практике это означает способность распознавания сложных иерархий признаков. Обычно после прохождения нескольких слоев карта признаков вырождается в вектор или даже скаляр, но таких карт признаков становятся сотни. На выходе *CNN* дополнительно устанавливают несколько слоев полносвязной нейронной сети (перцептрон), на вход которому подаются окончательные карты признаков. В данной архитектуре сети считается, что информация о факте наличия искомого признака важнее точного знания его координат, поэтому из нескольких соседних нейронов карты признаков выбирается максимальный и принимается за один нейрон уплотненной карты признаков меньшей размерности. За счет данной операции, помимо ускорения дальнейших вычислений, сеть становится более инвариантной к масштабу входного изображения.

Слой свертки – это основной блок *CNN*. Слой свертки включает в себя для каждого канала свой фильтр, ядро свертки которого обрабатывает предыдущий слой по фрагментам (суммируя результаты поэлементного произведения для каждого фрагмента). Весовые коэффициенты ядра свертки (небольшой матрицы) неизвестны и устанавливаются в процессе обучения. Особенностью сверточного слоя является сравнительно небольшое количество параметров, устанавливаемое при обучении. Так например, если исходное изображение имеет размерность 100×100 пикселей по трём каналам (это значит 30 000 входных нейронов), а сверточный слой использует фильтры с ядром 3×3 пикселя с выходом на 6 каналов, тогда в процессе обучения определяется только 9 весов ядра, однако по всем сочетаниям каналов, то есть $9 \times 3 \times 6 = 162$, в таком случае данный слой требует нахождения только 162 параметров, что существенно меньше количества искомого параметров полносвязной нейронной сети.

Скалярный результат каждой свертки попадает на функцию активации, которая представляет собой некую нелинейную функцию. Слой активации обычно логически объединяют со слоем. В качестве функции активации используются гиперболический тангенс ($f(x) = \tanh(x)$), сигмоида ($f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$) или *ReLU*, которая позволяет существенно ускорить процесс обучения и одновременно упростить вычисления. По состоянию на 2021 год эта функция, ее модификации *Noisy ReLU*, *Leaky ReLU* и другие являются наиболее часто используемыми функциями активации в *CNN*.

Таким образом ключевым преимуществом использования архитектуры *CNNs* для задач *NLP* является применение нелинейной функции к последовательности слов путем перемещения окна по предложению. Эта функция, которая также называется "фильтром", преобразует входные данные (окно k -слов) в d -мерный вектор, состоящий из значимых характеристик слов в окне. Затем применяется операция объединения векторов, полученных из разных каналов, в один n -мерный вектор.

В настоящее время модели *CNN* используются для решения таких задач классификации *NLP* как семантическая маркировка ролей [3], классификация типов вопросов [17], категоризации текста [6].

Отметим также исследование [18], в котором модель *mQA CNNs* используется для визуализации ответов на вопросы о содержимом изображения. Эта модель состоит из памяти для извлечения представления запроса, памяти для обработки контекста ответов и модуля генерации ответа, который собирает информацию из памяти для предоставления ответов. Ответ может быть в форме слова, фразы или предложения. В [19, 14] *CNNs* применяется для решения проблемы неоднозначности при семантической кластеризации как коротких, так и длинных текстов.

Таким образом, преимущества использования *CNN* для решения задач *NLP* состоят в следующем:

- ◆ по сравнению с полносвязной нейронной сетью требуется гораздо меньшее количество настраиваемых весов, так как одно ядро весов используется целиком для всего изображения, вместо того чтобы искать для каждого пикселя входного изображения свои персональные весовые коэффициенты. Это подталкивает нейросеть при обучении к обобщению демонстрируемой информации, а не попиксельному запоминанию каждой показанной картинке в мириадах весовых коэффициентов, как это делает перцептрон;
- ◆ распараллеливание вычислений, а следовательно, возможность реализации алгоритмов работы и обучения сети на графических процессорах;
- ◆ относительная устойчивость к повороту и сдвигу распознаваемого изображения;
- ◆ обучение при помощи классического метода обратного распространения ошибки.

К недостаткам *CNN* можно отнести большое число варьируемых параметров сети: количество слоев, размерность ядра свертки для каждого из слоев, количество ядер для каждого из слоев, шаг сдвига ядра при обработке слоя, необходимость слоев субдискретизации, степень уменьшения ими размерности, функция по уменьшению размерности (выбор максимума, среднего и т. п.), передаточная функция нейронов, наличие и параметры выходной полносвязной нейросети на выходе сверточной. Все эти параметры существенно влияют на результат, но выбираются исследователями эмпирически. Пока не существует выверенных и работающих рекомендаций, по которым нужно строить оптимальную архитектуру сверточной нейронной сети для новой задачи.

Предлагается биоинспирированный алгоритм для оптимизации архитектуры *CNN*.

Оптимизация архитектуры сверточных нейронных сетей с помощью эволюционного алгоритма. Рассмотрим нейроэволюционный подход для решения существующих *CNN* проблем.

Нейроэволюция – это метод машинного обучения, который применяет эволюционные алгоритмы для построения и обучения нейронных сетей [20]. В нейроэволюции моделируются базовые положения теории биологической эволюции – процессы отбора, мутации и воспроизводства. Поведение агентов определяется окружающей средой. Множество агентов принято называть популяцией. Такая популяция эволюционирует в соответствии с правилами отбора и целевой функцией, задаваемой окружающей средой. Таким образом, каждому агенту популяции назначается значение его пригодности в окружающей среде. Размножаются только наиболее пригодные виды. Рекомбинация и мутация позволяют изменяться агентам и приспособляться к среде.

В нейроэволюции генотип – это представление нейросети. В схеме с прямым кодированием генотип эквивалентен фенотипу, нейроны и связи непосредственно указаны в генотипе. Напротив, в схеме с непрямым кодированием в генотипе указаны правила и структуры для создания нейросети. Процесс нейроэволюции сначала инициализирует набор этих геномов, а затем применяет их к проблемной среде. Каждому геному присваивается фитнес оценка, основанная на том, насколько хорошо нейронная сеть решает прикладная задача. Например, этот показатель пригодности может быть функцией точности, достигнутой в задаче обработки лингвистической информации.

Эволюционные сверточные нейронные сети (*Evolutionary CNN, ECNN*) в дополнение к обучению используют эволюцию для оптимизации архитектуры *CNN*. Нейроэволюция – это агностический процесс, который не предусматривает какой-либо конкретной топологии или гиперпараметров для генерируемых нейронных сетей. Нейросеть эволюционирует на основе обратной связи о том, насколько эффективно она работает в проблемной среде.

Предлагаемый эволюционный алгоритм работает следующим образом. В начале он инициализирует случайную популяцию из малого числа агентов (не более 5) и с помощью фитнес функции получает оценки каждого агента в популяции. Затем проводится турнирная селекция между всеми агентами и с вероятностью 1 применяется оператор кроссинговера между выбранными агентами. В следующем поколении сохраняется лучший агент из прошлого поколения (стратегия элитизма). Таким образом, есть гарантия того, что информация о хорошей *CNN* не будет потеряна.

В предлагаемом алгоритме используются несколько типов слоев *CNN*: сверточный слой, максимальный слой пулинга (субдискретизации), средний слой пулинга и полносвязный слой. Позиции в списке слоев в хромосоме содержат информацию о типе слоя, количестве выходных карт, количестве нейронов, а также о размере ядра. Первым шагом предлагаемого алгоритма является создание популяции из малого числа *CNN*, удовлетворяющих следующим ограничениям:

- ◆ в архитектуре *CNN* должно быть не менее трех слоев;
- ◆ первый слой должен быть сверточным;
- ◆ выходной слой должен быть полносвязным слоем с количеством нейронов, равным количеству классов;
- ◆ в сверточном слое количество фильтров (выходных карт объектов) не должно превышать заранее установленного максимального количества;
- ◆ количество слоев пулинга не должно превышать заданную границу.

Следующим шагом алгоритма является вычисление фитнес функции каждого агента в популяции, турнирная селекция и применение оператора кроссинговера между *CNN*. Худший агент заменяется на лучший и проверяется условие останова алгоритма.

Предложенный алгоритм был протестирован на локальном компьютере с графическим процессором *ASUS Cerberus GeForce® GTX 1050 Ti OC Edition* 4 Гб *GDDR5*, 8 Гб оперативной памяти и процессором *Intel(R) Core(TM) i5-4670*. Для завершения выполнения алгоритма потребовалось около 1 часа. Для создания и обучения *CNN* был использован популярный фреймворк *TensorFlow* [21]. Для оценки алгоритма использовались общедоступные наборы данных: *MNIST* [22] и *MNIST-RB* [23]. *MNIST* содержит черно-белые изображения рукописных букв и цифр с 50 000 обучающими образцами и 10 000 тестовыми образцами. *MNIST-RB* является модифицированной версией *MNIST*, потому что проверяет, насколько хорошо *CNN* может обобщать данные, содержащие не относящуюся к проблеме информацию. Все они содержат 12 000 обучающих образцов и 50 000 тестовых образцов.

Предлагаемый для оптимизации архитектур сверточных нейронных сетей эволюционный алгоритм обладает явным преимуществом – малый размер популяции, которую использует алгоритм для оптимизации. Это важно, поскольку из-за сложности *CNN* для обучения одной сети требуется значительное время. Результаты экспериментов показывают, что предлагаемый нейроэволюционный подход способен достаточно быстро найти оптимизированную архитектуру *CNN* для любого заданного набора данных. Алгоритм позволяет находить архитектуру *CNN*, которая имеет приемлемые значения точности.

Дискуссия и будущие исследования. Создание системы машинного обучения требует специальных знаний в предметной области для разработки модели классификатора, преобразования необработанных данных во внутренние входные данные представления или векторы. Это называется обучением представлению (*Representation Learning, RL*), при котором модель автоматически подает необработанные данные для определения необходимого представления.

В частности, способность точно представлять слова, фразы, предложения (утверждение или вопрос) на естественном языке, а также их классификацию, имеет важное значение для понимания языка. Подходы к глубокому обучению аналогичны методам *RL*, использующим несколько уровней репрезентативной обработки [1].

Эти подходы могут быть объединены с другими моделями *DL* для повышения производительности задач *NLP*. Нейронные сети прямой связи могут обеспечить конкурентоспособную производительность в задачах *NLP* с последовательным вводом. Однако, если проблема связана с разреженностью входных данных, то перспективнее ее решать с помощью *CNNs*. Реализация *CNN* чаще всего используется в таких задачах *NLP*, как классификация предложений, категоризация текста, семантическая кластеризация и ответы на вопросы. Однако есть проблема с выбором оптимальной архитектуры сверточной нейронной сети для новой задачи. Эту проблему можно решить, используя предлагаемый выше эволюционный алгоритм, отличительной чертой которого является малый размер популяции *CNNs*, которую использует алгоритм для оптимизации.

Методы *DL* обеспечивают повышенную производительность для задач *NLP* не только благодаря современным процессорам. Методы *DL* используют многослойную систему нелинейных фильтров для извлечения признаков с преобразованием. Каждый последующий слой получает на входе выходные данные предыдущего слоя. Система глубокого обучения обладает несколькими слоями выявления признаков или параметров представления данных. При этом признаки организованы иерархически, признаки более высокого уровня являются производными от признаков более низкого уровня. В процессе обучения слои формируются на нескольких уровнях представлений, которые соответствуют различным уровням абстракции; слои образуют иерархию понятий.

Состав и количество конкретных нелинейных слоев зависит от решаемой проблемы. Й. Шмидхубер выделяет «очень глубокое обучение», когда число слоев больше десяти.

Мы ожидаем, что модели *RNN*, имеющие дело с последовательностями входных данных, окажут большое влияние на понимание естественного языка в течение ближайших нескольких лет, особенно при решении таких задач, как текстовый разговор, ответы на вопросы, анализ высказанных мнений.

Обзор задач *NLP* с использованием подходов *DL* для семантического анализа текста с помощью *ANN*, *CNN* и *RNN* представлен в табл. 1.

Таблица 1

Обзор задач *NLP* с использованием подходов *DL* для семантического анализа текста

Задачи понимания текста	ANNs	CNNs	RNNs
Классификация предложений		√	
Распознавание именованных сущностей	√		
Категоризация текста		√	
Маркировка семантической роли		√	
Семантическая кластеризация		√	
Короткий текстовый разговор	√		√
Ответ на вопрос	√	√	√
Анализ мнений	√		√
Обнаружение перефразирования	√		
Классификация документов	√		
Категоризация тем		√	
Прогнозирование выражения мнения			√

Заключение. В статье анализируются подходы, основанные на глубоком обучении, к задачам обработки естественного языка. Представлены исследования, охватывающие различные задачи *NLP*, реализованные с помощью *ANNs*, *CNNs* и *RNNs*. Эти архитектуры позволили решать широкий спектр задач, ранее не поддававшихся эффективному решению, например, в компьютерном зрении, машинном переводе, распознавании речи и обработке естественного языка. Были достигнуты неплохие результаты при решении различных задачах *NLP*, таких как моделирование предложений, маркировка семантической роли, распознавание именованных сущностей, ответы на вопросы, категоризация текста и машинный перевод.

К преимуществам использования *CNN* для решения задач *NLP* относятся гораздо меньшее количество настраиваемых весов по сравнению с полносвязной нейронной сетью, возможность реализации алгоритмов работы и обучения сети на графических процессорах, относительная устойчивость к повороту и сдвигу распознаваемых объектов, возможность обучения при помощи метода обратного распространения ошибки. К недостаткам *CNN* относится большое число варьируемых параметров сети, выбираемых исследователями эмпирически. Мы предлагаем для оптимизации архитектур сверточных нейронных сетей эволюционный алгоритм, обладающий таким преимуществом как малый размер популяции сетей. Это оказалось важным, поскольку из-за сложности *CNN* для обучения одной сети требуется значительное время. Результаты экспериментов показали, что предлагаемый нейроэволюционный подход способен достаточно быстро найти оптимизированную архитектуру *CNN* для заданного набора данных с приемлемым значением точности.

Мы не обсуждали вопросы сравнения производительности нейронных сетей, связанные с методами глубокого обучения, используемыми для задач обработки естественного языка. Это следует всесторонне изучить в рамках будущих исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ba L. & Caurana R. Do Deep Nets Really Need to be Deep?, *arXiv preprint arXiv:1312.6184*, 2013, 521(7553), pp. 1-6.
2. Kalchbrenner N., Grefenstette E., & Blunsom P. A Convolutional Neural Network for Modeling Sentences, *In Proc. of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, ACL 2014, Baltimore, MD, USA*, 2014, Vol. 1, pp. 655-665.

3. Collobert R., Weston J., Bottou L., Karlen M., Kavukcuglu K., Kuksa P. Natural Language Processing from Scratch, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12:2493-2537.
4. Santos C.N., Dos & Guimarães V. Boosting Named Entity Recognition with Neural Character Embeddings, *ACL'2015*, pp. 25-33.
5. Iyyer M., Boyd-Graber J., Claudino L., Socher R. A neural network for factoid question answering over paragraphs, *In EMNLP*, 2014.
6. Johnson R. & Zhang T. Semi-supervised Convolutional Neural Networks for Text Categorization via Region Embedding, 2015. pp. 1-12.
7. Golosio B., Cangelosi A., Gamotina O. & Masala G.L. A Cognitive Neural Architecture Able to Learn and Communicate through Natural Language, *Plos-One*, 2015, 10 (11).
8. Weston J., America N.E. C.L. & Way I. A Unified Architecture for Natural Language, *Processing: Deep Neural Networks with Multitask Learning*, 2008, pp. 160-167.
9. Sun Y., Lin L., Tang D., Yang N., Ji Z. & Wang X. Modelling Mention, Con-text and Entity with Neural Networks for Entity Disambiguation, 2015. pp. 1333-1339.
10. Malinowski M., Rohrbach M. & Fritz M. 2015. Ask Your Neurons: A Neural based Approach to Answering Questions about Images, *IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, 2015, pp. 1-9.
11. Yu L., Hermann K.M., Blunsom P. & Pulman S. Deep Learning for Answer Sentence Selection, *NIPS Deep Learning Workshop*, 2014, 9.
12. Karl Moritz Hermann and Phil Blunsom. Multilingual Models for Compositional Distributional Semantics, *In Proceedings of ACL*, 2014.
13. Shang L., Lu Z. & Li H. Neural Responding Machine for Short-Text Conversation, *ACL'2015*, 2015. pp. 1577-1586.
14. Wang P., Xu J., Xu B., Liu C., Zhang H., Wang F. & Hao H. Semantic Cluster-ing and Convolutional Neural Network for Short Text Categorization. *Proceedings ACL'2015*, 2015, pp. 352-357.
15. Dong L., Wei F., Tan C., Tang D., Zhou M., & Xu K. Adaptive Recursive Neural Network for Target-dependent Twitter Sentiment Classification, *ACL'2014*, 2014, pp. 49-54.
16. LeCun Y. and Bengio, YConvolutional networks for images, speech, and time-series. MIT Press, 1995, pp. 255-258.
17. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification, *Proc. of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP'2014)*, 2014, pp. 1746-1751.
18. Gao H., Mao J., Zhou J., Huang Z., Wang L. & Xu W. Are You Talking to a Machine? Dataset and Methods for Multilingual Image Question Answering, *Arxiv*, 2015, pp. 1-10.
19. Shen Y., He X., Gao J., Deng L. & Mesnil G. A Latent Semantic Model with Convolutional-Pooling Structure for Information Retrieval, *Proc. of the 23rd ACM Int. Conf. on CIKM'2014*, 2014), pp. 101-110.
20. Rodzin S., Rodzina O., Rodzina L. Neuroevolution: Problems, algorithms, and experiments, *Proc. of the 10th IEEE Int. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT'2016)*, 2016, 7991745.
21. Alshahrani S., and Kapetanios E. Are Deep Learning Approaches Suitable for Natural Language Processing?, *Proc. of the 21st Int. Conf. on Applications of Natural Language to Information Systems (NLDB'2016)*, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-41754-7_33.
22. LeCun Y., et al. Back propagation applied to handwritten zip code recognition, *Neural Comput*, 1989, 1 (4), pp. 541-551.
23. Larochelle H., Erhan D., Courville A., Bergstra J., Bengio Y. An empirical evaluation of deep architectures on problems with many factors of variation, *in ACM International Conf. Proc. Series*, 2007, Vol. 227, No. 2006, pp. 473-480.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой САПР; д.т.н.; профессор.

Родзин Сергей Иванович – e-mail: srodzin@sfedu.ru; тел.: 88634371673; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; профессор.

Бова Виктория Викторовна – e-mail: bova@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Kureichik Vladimir Victorovich – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Rodzin Sergey Ivanovich – e-mail: srodzin@sfedu.ru; phone: +78634371673; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; professor.

Bova Viktoriya Viktorovna – e-mail: bova@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

УДК 004.42+004.3; 57.08+615.47+615.8 DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-199-212

А.В. Проскуряков

**СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО И ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ВЕРИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ
МЕДИЦИНСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Описаны информационное и программное обеспечение реализации различных методов верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям подсистемой поддержки принятия решения для диагностики заболеваний. Указано на современное состояние развития медицинской диагностической техники, оснащённость которой медицинских учреждений страны и не оперативная её доступность для населения способствовало и привело к появлению и активному развитию новых направлений в области лучевой диагностики, к которым относятся: цифровая и пленочная рентгенография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография. В статье акцент сделан на анализ рентгенографических изображений, принятие решений на основании анализа этих изображений, постановка диагноза на основании принятых решений. Сделан анализ преимуществ и недостатков рентгенографии, как современного способа диагностики, относительно своих аналогов. Важной задачей при анализе рентгенографических изображений медицинских биологических объектов и их фрагментов является решение задачи улучшения качества изображения. С целью улучшения качества рентгеновских снимков и повышения их информативности разработан алгоритм и реализовано программное обеспечение подсистемы программного обеспечения медицинской автоматизированной информационной системы для их коррекции и анализа. В статье рассматривается реализация решения задач диагностики заболеваний, таких как: анализ рентгенографических изображений, принятие решений на основании анализа этих изображений, постановка диагноза на основании принятых решений путём разработки и применения программного и информационного обеспечения реализации методов верификации состояния фрагментов биологических объектов, как эффективных методов диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим и компьютерно-томографическим изображениям. Описаны основные методы, лежащие в основе верификации по рентгеновским и компьютерно-томографическим изображениям. Приведен детальный анализ реализации математических моделей методов диагностики в виде алгоритмов, реализуемых программным обеспечением для функционирования подсистемы поддержки принятия решения медицинской автоматизированной информационной системы. Показаны примеры практической реализации программного и информационного обеспечения методов верификации медицинских объектов в виде экранных форм для работы с фрагментами исследуемого объекта и результатами анализа рентгенографических изображений. Это позволяет повысить оперативность, точность верификации состояния медицинских биологических объектов, достоверность процесса диагностики заболеваний. Показана научная новизна, результаты апробации материала, представленного в статье на международных, всероссийских конференциях, научных журналах.

Биологический; верификация; безэталонный метод верификации; диагностика; информация; медицинский; метод; метод эталонный; статистика; рентгенография; томография; энтропия; эталон.

A.V. Proskuryakov

SYNTHESIS OF SOFTWARE AND INFORMATION SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION OF METHODS FOR VERIFICATION OF THE STATE OF MEDICAL BIOLOGICAL OBJECTS FOR A MEDICAL AUTOMATED INFORMATION SYSTEM

This article describes the information and software for the implementation of various methods for verifying the state of fragments of biological objects using computed tomographic images by the decision support subsystem for the diagnosis of diseases. It is pointed out the current state of development of medical diagnostic equipment, the equipment of which medical institutions of the country and its non-operational accessibility to the population contributed to and led to the emergence and active development of new directions in the field of radiation diagnostics, which include: digital and film radiography, computed tomography, magnetic resonance imaging. The article focuses on the analysis of X-ray images, decision-making based on the analysis of these images, diagnosis based on the decisions made. The advantages and disadvantages of radiography as a modern diagnostic method are analyzed relative to their analogues. An important task in the analysis of radiographic images of medical biological objects and their fragments is to solve the problem of image quality improvement. In order to improve the quality of X-ray images and increase their informativeness, an algorithm has been developed and the software of the software subsystem of the medical automated information system for their correction and analysis has been implemented. The article discusses the implementation of solving problems of diagnosis of diseases, such as: analysis of radiographic images, decision-making based on the analysis of these images, diagnosis based on the decisions made by developing and applying software and information support for the implementation of methods for verifying the state of fragments of biological objects as effective methods for diagnosing the state of paranasal sinuses by their radiographic and computed tomographic images. The main methods underlying verification by X-ray and computed tomography images are described. A detailed analysis of the implementation of mathematical models of diagnostic methods in the form of algorithms implemented by software for the functioning of the decision support subsystem of a medical automated information system is given. Examples of practical implementation of software and information support for verification methods of medical objects in the form of screen forms for working with fragments of the object under study and the results of the analysis of radiographic images are shown. This makes it possible to increase the efficiency, accuracy of verification of the state of medical biological objects, the reliability of the disease diagnosis process. The scientific novelty, the results of the approbation of the material presented in the article at international, All-Russian conferences, scientific journals are shown.

Biological; verification; non-etalon verification method; diagnostics; information; medical; method; reference method; statistics; radiography; tomography; entropy; standard.

Введение. Современный этап развития медицины в мире, в том числе и в Российской Федерации, характеризуется развитием и внедрением новых методов, способов диагностики, позволяющих повысить своевременность, точность и достоверность диагностических мероприятий в различных областях и направлениях медицины. Учитывая современное состояние развития медицинской диагностической техники, оснащённость данной техникой медицинских учреждений страны и не оперативная её доступность для населения способствовало и привело к появлению и активному развитию новых направлений в области лучевой диагностики, к которым относятся:

- а) цифровая и плёночная рентгенография;
- б) компьютерная томография [1];
- в) магнитно-резонансная томография.

Современные томографы не оснащены программным и информационным обеспечением, позволяющим осуществлять поддержку принятия решения при диагностике заболевания, и тем самым не позволяют избежать ошибочных решений на конечном этапе постановки диагноза. Необходимо отметить отсутствие

томографов в районных центрах, городах прямого областного и краевого подчинения, не имеющих финансовых ресурсов для приобретения дорогостоящей диагностической аппаратуры. Как правило, компьютерные томографы находятся в диагностических центрах и употребляются в универсальных целях, то есть для отображения большого набора различных заболеваний, несмотря на это, вынесение решения по анализу состояния пациента зависит от медицинской энциклопедической эрудиции, обслуживающего рентгеновский аппарат или томограф рентгенолога. Следует отметить, что в области ЛОР и других заболеваний, необходимо констатировать наличие в практике диагностики посредством верификации состояния фрагментов биологических объектов, на примере лобных и верхнечелюстных пазух, лёгочных заболеваний следующей технологической последовательной цепочки, которая включает: «рентгенологическое изображение» диагностируемого объекта – заключение рентгенолога – врача клинициста, заказавшего диагностическое исследование», результатом которой является принятие решения по хирургическому или медикаментозному воздействию на пациента [2]. Недостатком, как показывает опыт специалистов в области ЛОР – заболеваний [3], является недостаточная эффективность диагностики в соответствии вышеупомянутой технологической диагностической цепочкой, которая составляет порядка 70%. Столь низкий уровень достоверности объясняется интуитивным качественным анализом рентгенографического изображения как рентгенологом, так и врачом клиницистом. С целью максимального исключения ошибочных решений при диагностировании состояний лобных и верхнечелюстных пазух пациентов предлагается автоматическое цифровое распознавание и идентификацию рентгенографических изображений в пленочном, электронном и компьютерно-томографическом представлении. Поэтому все вышеперечисленные проблемы очевидны и указывают на актуальность, инновационный, научный и прикладной характер темы, рассматриваемой в данной статье [4–6].

Постановка задачи. В данной работе акцент сделан на:

- 1) анализ рентгенографических изображений;
- 2) принятие решений на основании анализа этих изображений;
- 3) постановка диагноза на основании принятых решений.

Анализ рентгенографических изображений, принятие решений на основании анализа этих изображений, постановка диагноза на основании принятых решений подсистемой принятия решений медицинской автоматизированной информационной системой (МАИС) должны осуществляться путём разработки и применения программного и информационного обеспечения для обслуживания подсистемы принятия решений.

В условиях жесткой конкуренции рентгенография **имеет ряд преимуществ** относительно своих аналогов:

- 1) широкая доступность метода и лёгкость в проведении исследований;
- 2) для большинства исследований не требуется специальной подготовки пациента;
- 3) относительно низкая стоимость исследования;
- 4) снимки могут быть использованы для консультации у другого специалиста или в другом учреждении.

Рентгенография также **имеет ряд недостатков**:

- 1) статичность изображения – сложность оценки функции органа;
- 2) наличие ионизирующего излучения, способного оказать вредное воздействие на организм пациента;
- 3) рентгеновские изображения отражают суммарную рентгеновскую тень анатомических структур, в отличие от послойных серий изображений, получаемых современными томографическими методами;

4) рентгеновские снимки могут иметь низкий уровень информативности за счет зашумленности и слабой интенсивности полученного изображения [2, 7–9].

Важной задачей при анализе рентгенографических изображений медицинских биологических объектов и их фрагментов является решение задачи улучшения качества изображения.

С целью улучшения качества рентгеновских снимков и повышения их информативности был разработан алгоритм и реализовано программное обеспечение подсистемы программного обеспечения для их коррекции и анализа, включающая следующие функциональные возможности:

- 1) поворот, отражение и инвертирование изображения;
- 2) применение алгоритмов шумоподавления;
- 3) коррекция общей интенсивности изображения;
- 4) анализ областей методами математической статистики.

Вышеперечисленные функциональные возможности показаны на рис. 1–3.

В статье рассматриваются следующие этапы реализации проекта решения задач диагностики заболеваний, таких как: анализ рентгенографических изображений, принятие решений на основании анализа этих изображений, постановка диагноза на основании принятых решений путём разработки и применения программного и информационного обеспечения реализации методов верификации состояния фрагментов биологических объектов, как эффективных методов диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим и компьютерно-томографическим изображениям:

1) разработать цифровую модель представления исследуемого фрагмента (лобной и верхнечелюстной пазух) по его статическим отображениям (рентгенограмма, томограмма, диафаногамма);

2) разработать и адаптировать к признакам патологий объектов отоларингологической среды математическое и программное обеспечение для синтеза и анализа их адекватных моделей на основе статистической базы данных, сконструированной по имеющимся историям болезней пациентов городской клиники;

3) разработать методологию построения статистических портретов (образов) цифровых и пленочных изображений отоларингологических фрагментов с различными признаками заболеваний в соответствии с их возрастной классификацией - как основу автоматизированной экспертной системы поддержки принятия решения при вынесении советуемого решения в процессе диагностике.

Реализация. Описание методов, используемых для диагностики

1. Метод сравнения с эталоном, основанный на математической статистике. Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей.

В качестве эталона выбираем такой фрагмент снимка, на котором имеет место постоянное значение интенсивности яркости, в работе в качестве эталона было принято изображение глазницы. Таким образом, представив лобную пазуху и глазницу в виде матриц X и Y , размерами $n \times n$, можно приступить к их математической обработке. Основные этапы алгоритма эталонного способа метода диагностики могут быть представлены следующим образом.

1. Первым этапом является вычисление нормированной гистограммы распределения уровней яркости фрагмента $h_i(r_k)$ по формуле 1.

$$h_i(r_k) = \frac{n_k}{n_i}, \quad (1)$$

где n_i – общее количество пикселей в исходном фрагменте изображения, n_k – число пикселей изображения, уровень которых равен r_k .

Таким образом, гистограммная модель плотности распределения вероятностей яркости диагностически – информативных фрагментов рентгеновских изображений в носоподбородочной проекции позволяет:

- ◆ представить исследуемый фрагмент;
- ◆ оценить его яркостное распределение;
- ◆ сравнить с другими диагностически – информативными областями рентгенограммы и оценить состояние пациента.

Следующими этапами диагностики будет:

2. Второй этап. Сравнение между собой средних значений.

$$M^*[Y] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \bar{Y}_{cp} \text{ и } M^*[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X}_{cp}. \quad (2)$$

3. Третий этап. Сравнение между собой дисперсий.

$$D^*[X] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_{cp})^2 \text{ и } D^*[Y] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_{cp})^2. \quad (3)$$

4. Четвёртый этап. Вычисление среднеквадратического отклонения для области пазухи по формуле 4.

$$\sigma[X] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_{cp})^2} \quad (4)$$

Пятый этап. Вычисление вариационного коэффициента для области пазухи по формуле 5.

$$v[X] = \frac{\sigma[X]}{M[X]} \quad (5)$$

Таким образом оценку состояния лобной пазухи или верхнечелюстной осуществим посредством отношений математических ожиданий объекта и эталона и с помощью вариационного коэффициента, определяемых отношением среднеквадратичных отклонений к математическим ожиданиям соответственно для каждой гистограмм. Патология лобной пазухи будет иметь место, если отношение между математическими ожиданиями соответствующих гистограмм объекта и эталона будет превышать единицу, а коэффициент вариации лобной пазухи или верхнечелюстной будет превышать соответствующий коэффициент эталона [10–12, 14, 15].

Недостатком эталонного способа при автоматической диагностике рентгенографического изображения является качество изображения такого выбранного фрагмента снимка, на котором имеет место постоянное значение интенсивности яркости. Данная погрешность может привести к существенному искажению качества результата обработки снимка и тем самым к неточному или неправильному диагнозу заболевания пациента, что может в некоторых случаях привести к неверному медикаментозному или хирургическому лечению.

2. Метод, основанный на вычислении расстояния между изображениями эталона и исследуемой области. Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей. Проведя анализ матрицы яркости эталона, получаем среднее значение яркости пикселей. Формируем вспомогательную матрицу относительно небольшого размера, в зависимости от размера исследуемой области. Используем формулу 4 для вычисления расстояния между изображениями, которое представляет собой нормированные квадраты разностей интенсивности пикселей для каждого положения вспомогательной матрицы на исследуемой области.

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x',y'} (T(x',y') - I(x+x',y+y'))^2}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x',y')^2 * \sum_{x',y'} I(x+x',y+y')^2}} \quad (6)$$

где T – вспомогательная матрица яркости пикселей, I – матрица яркости пикселей исследуемой области.

Позиция, где коэффициент корреляции достигает своего наибольшего значения, является позицией наилучшего соответствия. Область вокруг позиции наилучшего соответствия, рассматривается как область с патологией, если отношение между средним значением вспомогательной матрицы и средним значением области наилучшего соответствия не превышает 0.85.

3. Метод, основанный на вычислении оценки информативности эталона и исследуемой области. Информативность рентгеновского изображения оценивается объемом полезной диагностической информации, которую врач получает при изучении снимка. В конечном итоге, она характеризуется различимостью на снимках деталей исследуемого объекта.

Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей. Определяем для исследуемой области и эталона, характеризующие их информационные индексы, используя формулу 7.

$$Q = \sum_{x=0}^{x_{max}} \sum_{y=0}^{y_{max}} \left(\frac{2|I_{x,y} - I_{x,y+1}|}{I_{x,y} + I_{x,y+1}} \geq c_{min}, 1.0 \right) \frac{1}{n} + \sum_{x=0}^{x_{max}} \sum_{y=0}^{y_{max}} \left(\frac{2|I_{x,y} - I_{x+1,y}|}{I_{x,y} + I_{x+1,y}} \geq c_{min}, 1.0 \right) \frac{1}{n}, \quad (7)$$

где x_{max} и y_{max} – число пикселей в строке и столбце соответственно, $I_{x,y}$ – яркость пикселя с координатами (x, y) , c_{min} – минимально воспринимаемый контраст (0.03 для реальных медицинских рентгенограмм), n – общее количество, рассматриваемых пикселей [16, 18–20].

4. Реализация. Информационно-энтропийный метод диагностики. Он основан на методе исчисления новой (непредсказуемой) и избыточной (предсказуемой) информации Клода Шеннона. При таком анализе мы рассчитываем показатель энтропии целевой области, рассчитываем максимальный показатель энтропии (исходя из количества уровней изображения), и, сравнивая полученные два значения, делаем вывод анализа (по принципу – чем больше энтропия, тем хуже). Данный подход также позволяет получить релевантный результат при условии хорошей ограниченности исследуемого объекта (исследуемый объект должен включать всю исследуемую область, и не включать ничего кроме этого) [13, 16, 17].

При векторном описании изображения среднее количество информации в изображении равно энтропии источника:

$$H(f) = - \sum_{t=1}^t P(f_t) \log P(f_t). \quad (8)$$

Данный подход предполагает реализацию следующего алгоритма:

- 1) исследуемое изображение рентгеновского снимка разбивается на отдельные участки – сегменты;
- 2) размеры участка могут варьироваться в зависимости от наличия априорной информации об искомом признаке патологии (размер исследуемого фрагмента лобной, носоподбородочной области, области грудной клетки и т.д.);

3) оцифровка фрагмента – участка заключается в его декомпозиции – анализе в виде размеров точки, с ранее заданной масштабной сеткой налагаемой на исследуемый снимок;

4) масштаб сетки формируется в процессе диагностики, то есть выполняется адаптация;

5) каждый фрагмент представляется в виде матрицы значений размером $n \times n$ денситометрического параметра: плотности яркости или черноты;

б) каждая матрица в соответствии со стандартным алгоритмом обработки отображается в виде гистограммы распределений частности денситометрии параметра с последующим определением основных числовых характеристик: среднее арифметическое, выборочная (исправленная) дисперсия, среднеквадратическое отклонение (СКО), коэффициент вариации для оценки гистограммы. В результате каждая гистограмма является основой для оценки соответствующего сегмента снимка среднестатистической и максимальной энтропией в стандартных единицах измерения битах.

Примеры практической реализации программного и информационного обеспечения методов верификации медицинских объектов. Экранная форма для работы с фрагментами исследуемого объекта посредством выделения эталонной области объекта показана на рис. 1.

Экранная форма для работы посредством выделения эталонного и исследуемого фрагмента объекта области объекта показана на рис. 2.

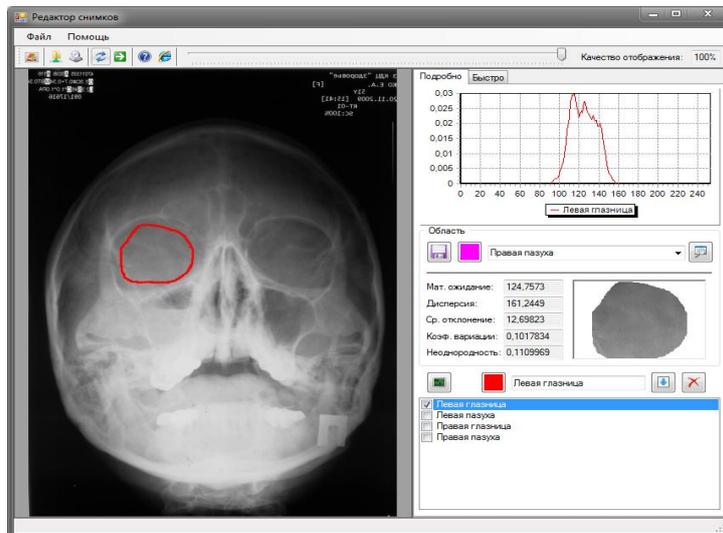


Рис. 1. Выделение эталонной области объекта

Пример экранной формы с результатами обработки эталонного и исследуемого фрагмента объекта показан на рис. 3.

На рис. 4 отдельно показан результат обработки исследуемого объекта при реализации метода диагностики, основанный на математической статистике, когда патология фрагмента исследуемого объекта отсутствует.

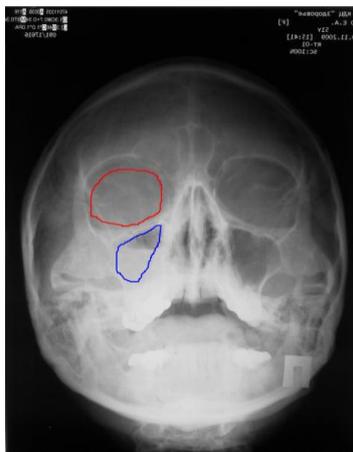


Рис. 2. Выделение эталонного и исследуемого фрагмента объекта

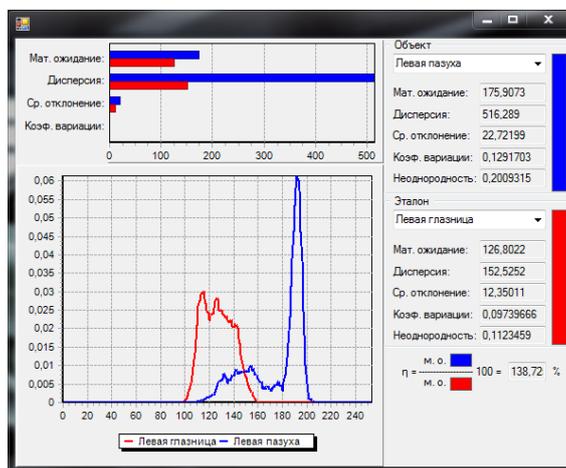


Рис. 3. Результаты обработки эталонного и исследуемого фрагмента объекта



Рис. 4. Отсутствие патологии фрагмента исследуемого объекта

На рис. 5 отдельно показан результат реализации метода диагностики, основанный на математической статистике, когда патология исследуемого объекта присутствует.



Рис. 5. Наличие патологии исследуемого объекта расстояния между изображениями эталона и исследуемой области

Вся информация об оцифрованных рентгеновских снимках пациентов хранится в электронном виде в базе данных (БД).

Первоначально база данных не содержит никакой информации, поэтому для работы с программным обеспечением медицинской автоматизированной системы необходимо наполнить БД. То есть работа с системой начинается с процедуры наполнения БД информацией оцифрованных рентгеновских снимков пациентов.

Интерфейс диалогового окна «Форма базовой информации о пациенте» для заполнения БД показан на рис. 6.

Снимки, содержащиеся в базе данных, предназначены для выполнения над ними процедур редактирования и анализа в процессе постановки диагноза.

Поэтому одним из очень ответственных этапов работы с данной МАИС является заполнение базы данных. В программном и информационном обеспечении предусматривается два режима занесения информации в базу данных:

- 1) режим «Подробно»;
- 2) режим «Быстро».

Базовым режимом работы при заполнении БД является режим «Подробно».

Рис. 6. Диалоговое окно «Форма базовой информации о пациенте».

Если требуется быстрое заполнение базы данных (БД) большим количеством новых снимков, то необходимо перейти из режима «Подробно» в режим «Быстро». Интерфейс экранной формы окна режимов работы «Подробно» и «Быстро» показан на рис. 7.

В данной системе предоставляется возможность оперировать шаблонными названиями с уже заранее заданными цветами. Поэтому выделять области можно выбирая их шаблонные названия с уже заданными цветами. В сегменте «Данные пациента» часть полей будет автоматически заполнено, их так же можно изменить. Кнопка «Следующий» сохранит введенные данные и позволит выбрать новый снимок.

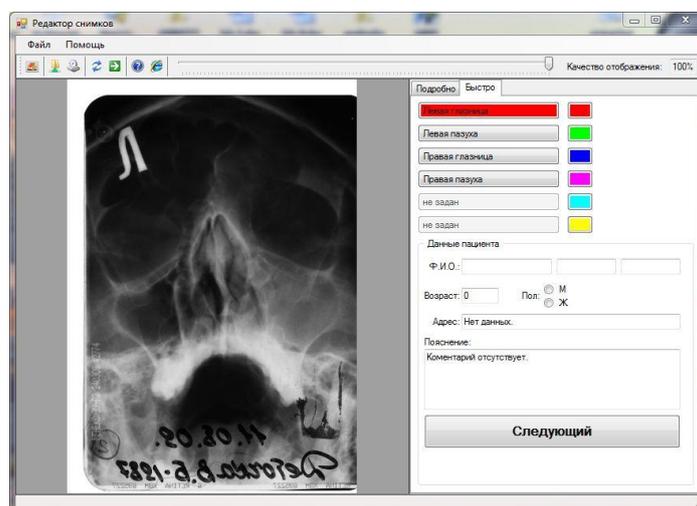


Рис. 7. Экранная форма быстрого заполнения базы данных

Научная новизна. Результаты. Научная новизна заключается в синтезе программного и информационного обеспечения медицинской автоматизированной информационной системы при реализации, применении методов верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям для диагностики заболеваний и использовании для этого статистических параметров (математическое ожидание, дисперсия, гистограмма, коэффициент вариации, коэффициент корреляции) для количественной оценки состояний лобной или верхнечелюстной пазухи и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим (томографическим) изображениям. Это позволило получить следующие результаты:

- 1) разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм обработки рентгенографических изображений с использованием эталонного и безэталонного – информационно-энтропийного способов метода диагностики инвариантного к видам заболеваний (параназальных пазух при ЛОР – заболеваниях, бронхо-лёгочных заболеваниях);
- 2) это позволило повысить качество обработки рентгенографических снимков и как следствие точность диагностики заболеваний;
- 3) разработанное программное обеспечение позволило повысить степень автоматизации процесса обработки рентгенографических снимков с элементами автоматической обработки, что позволяет формализовать процедуру постановки диагноза;
- 4) разработано программное обеспечение, реализующее алгоритмы обработки статистических параметров (гистограмма, математическое ожидание, коэффициент вариации) для количественной оценки состояний лобной или верхнечелюстной пазухи и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим и томографическим изображениям;

5) разработано информационное обеспечение – структура базы данных в виде набора связанных таблиц для хранения базовой информации о пациентах и процессе диагностики и лечения [18–20];

6) информационное обеспечение реализовано с возможностью инвариантности хранимой информации и моделей методов (способов) диагностики с целью возможности адаптации для различных лечебных учреждений;

7) результаты работы прошли апробацию на девяти международных и семнадцати Всероссийских научно-технических конференциях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Блинов Н.Н., Мазуров А.И.* Что впереди? // Медицинская техника. – 2006. – № 5. – С. 3-6.
2. *Блинов Н.Н., Мазуров А.И.* Проблемы расширения диагностических возможностей медицинской рентгентехники // Медицинская техника. – 2011. – № 5. – С. 1-5.
3. *Волков А.Г.* Лобные пазухи. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2000. – 512 с.
4. *Мухин Ю.Ю., Лебедев Г.С.* Подходы к параметрической оценке и сопоставлению функций медицинских информационных систем // Информационно-измерительные системы. – 2013. – № 10. – Т. 11. – С. 19-27.
5. *Гусев А.В., Романов Ф.А., Дуданов И.П., Воронин А.В.* Медицинские информационные системы: монография. – Петрозаводск: Петр.ГУ, 2005. – 404 с.
6. *Рожкова Н.И., Кочетова Г.П.* Динамика технической оснащённости диагностической службы Российской Федерации за 2002–2010 гг. // Медицинская техника. – 2012. – № 2. – С. 1-5.
7. *Волков А.Г., Самойленко А.П., Проскуряков А.В.* Метод диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим изображениям // X Международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2012). – 2012. – С. 63-67.
8. *Самойленко А.П., Проскуряков А.В.* Способы реализации метода диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим изображениям // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2014). – 2014. – С. 71-75.
9. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* АРМ поддержки принятия решений при диагностике ЛОР-заболеваний медицинской интегрированной автоматизированной информационной диагностической системы // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2014). – 2014. – С. 68-72.
10. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Подсистема математического и программного обеспечения поддержки принятия решений на базе способов диагностики заболеваний по рентгеновским снимкам «Медицинской автоматизированной диагностической информационной системы» // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 1. – С. 34-43. ISSN 1561-1531.
11. *Проскуряков А.В., Смерчинский Д.В.* Информационное обеспечение интегрированной автоматизированной системы обработки данных результатов обследования в медицинском учреждении // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 2. – С. 30-39. – ISSN 1561-1531.
12. *Проскуряков А.В.* Реализация способов диагностики заболеваний в медицинской автоматизированной информационной системе поддержки принятия решений // Сб. трудов XII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2016). Владимир, Суздаль, 2016. – С. 303-307.
13. *Тарасов Н.В., Проскуряков А.В.* Реализация алгоритма информационно-энтропийного анализа медицинских рентгенографических и томографических снимков // Матер. IV Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности» (ФПАКТИБ'2018). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2018. – С. 461-465.
14. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Формирование статистического образа для распознавания состояния репаративного процесса костных тканей // Сб. трудов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2018). Владимир, Суздаль, 2018. – С. 205-209.

15. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Методология верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Сб. трудов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2018). Владимир, Суздаль, 2018. – С. 209-212.
16. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Метод построения статистических портретов при реализации безэталонного способа обработки и анализа медицинских рентгенографических и томографических снимков // Сб. материалов XVI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСаиУ-2018). Ростов, Таганрог, 2018. – С. 207-213.
17. *Проскуряков А.В.* Реализация безэталонного способа обработки медицинских рентгенографических и томографических снимков для диагностики заболеваний // Матер. Всероссийской научнотехнической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «КомТех-2019». Ростов, Таганрог, 2019. – С. 156-164.
18. *Проскуряков А.В.* Верификация состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Матер. Всероссийской научнотехнической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «КомТех-2019». Ростов, Таганрог, 2019. – С. 169-175.
19. *Проскуряков А.В.* Синтез информационной системы верификации фрагментов медицинских биологических объектов для диагностики заболеваний на базе методов системно-концептуального подхода // Сб. материалов XVII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСаиУ-2019). Ростов, Таганрог, 2019. – С. 207-213.
20. *Проскуряков А.В.* Медицинская автоматизированная информационная система поддержки принятия решения для диагностики заболеваний с использованием верификации состояния фрагментов медико-биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Информатизация и связь. – 2020. – № 3. – С. 55-60.

REFERENCES

1. *Blinov N.N., Mazurov A.I.* Chto vpered? [What's ahead], *Meditsinskaya tekhnika* [Medical equipment], 2006, No. 5, pp. 3-6.
2. *Blinov N.N., Mazurov A.I.* Problemy rasshireniya diagnosticheskikh vozmozhnostey meditsinskoj rentgenotekhniki [Problems of expanding diagnostic capabilities of medical X-ray equipment], *Meditsinskaya tekhnika* [Medical equipment], 2011, No. 5, pp. 1-5.
3. *Volkov A.G.* Lobnye pazukhi [Frontal sinuses]. Rostov-on-Don: Izd-vo «Feniks», 2000, 512 p.
4. *Mukhin Yu.Yu., Lebedev G.S.* Podkhody k parametricheskoj otsenke i sopostavleniyu funktsiy meditsinskikh informatsionnykh sistem [Approaches to parametric assessment and comparison of functions of medical information systems], *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy* [Information and measurement systems], 2013, No. 10, Vol. 11, pp. 19-27.
5. *Gusev A.V., Romanov F.A., Dudanov I.P., Voronin A.V.* Meditsinskie informatsionnye sistemy: monografiya [Medical information systems: monograph]. Petrozavodsk: Petr.GU, 2005, 404 p.
6. *Rozhkova N.I., Kochetova G.P.* Dinamika tekhnicheskoy osnashchennosti diagnosticheskoy sluzhby Rossiyskoj Federatsii za 2002–2010 g.g. [Dynamics of technical equipment of the diagnostic service of the Russian Federation for 2002-2010], *Meditsinskaya tekhnika* [Medical equipment], 2012, No. 2, pp. 1-5.
7. *Volkov A.G., Samoylenko A.P., Proskuryakov A.V.* Metod diagnostiki sostoyaniya paranazal'nykh pazukh po ikh rentgenograficheskim izobrazheniyam [A method for diagnosing the condition of the paranasal sinuses by their radiographic images], *X Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2012)* [X International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2012)], 2012, pp. 63-67.
8. *Samoylenko A.P., Proskuryakov A.V.* Sposoby realizatsii metoda diagnostiki sostoyaniya paranazal'nykh pazukh po ikh rentgenograficheskim izobrazheniyam [Methods of realization of the method of diagnostics of the paranasal sinuses by their radiographic images], *Sb. trudov XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2014)* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FRAME'2014)], 2014, pp. 71-75.

9. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. ARM podderzhki prinyatiya resheniy pri diagnostike LOR-zabolevaniy meditsinskoj integrirovannoy avtomatizirovannoy informatsionnoy diagnosticheskoy sistemy [Decision support ARM in the diagnosis of ENT diseases of the medical integrated automated information diagnostic system], *Sb. trudov XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2014)* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Physics and Radioelectronics in medicine and ecology" (FRAME'2014)], 2014, pp. 68-72.
10. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Podsystema matematicheskogo i programmogo obespecheniya podderzhki prinyatiya resheniy na baze sposobov diagnostiki zabolevaniy po rentgenovskim snimkam «Meditsinskoj avtomatizirovannoy diagnosticheskoy informatsionnoy sistemy» [Subsystem of mathematical and software support for decision-making based on methods of diagnosis of diseases based on X-ray images of the "Medical automated diagnostic information system"], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers], 2015, No. 1, pp. 34-43. ISSN 1561-1531.
11. Proskuryakov A.V., Smerechinskiy D.V. Informatsionnoe obespechenie integrirovannoy avtomatizirovannoy sistemy obrabotki dannykh rezul'tatov obsledovaniya v meditsinskom uchrezhdenii [Information support of the integrated automated data processing system of examination results in a medical institution], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers], 2015, No. 2, pp. 30-39. ISSN 1561-1531.
12. Proskuryakov A.V. Realizatsiya sposobov diagnostiki zabolevaniy v meditsinskoj avtomatizirovannoy informatsionnoy sisteme podderzhki prinyatiya resheniy [Implementation of methods for diagnosing diseases in a medical automated information system for decision support], *Sb. trudov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2016)* [Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2016)]. Vladimir, Suzdal', 2016, pp. 303-307.
13. Tarasov N.V., Proskuryakov A.V. Realizatsiya algoritma informatsionno-entropiynogo analiza meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov [Implementation of the algorithm of information-entropy analysis of medical radiographic and tomographic images], *Mater. IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti» (FPAKTIB'2018)* [Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Fundamental and Applied Aspects of Computer Technology and Information Security" (FPAKTIB'2018)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2018, pp. 461-465.
14. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Formirovaniye statisticheskogo obraza dlya raspoznavaniya sostoyaniya reparativnogo protsessa kostnykh tkaney [Formation of a statistical image for recognition of the state of the reparative process of bone tissues], *Sb. trudov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2018)* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radioelectronics in Medicine and Ecology" (FRAME'2018)]. Vladimir, Suzdal', 2018, pp. 205-209.
15. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Metodologiya verifikatsii sostoyaniya fragmentov biologicheskikh ob'ektov po komp'yuterno-tomograficheskim izobrazheniyam [Methodology of verification of the state of fragments of biological objects using computed tomographic images], *Sb. trudov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2018)* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2018)]. Vladimir, Suzdal', 2018, pp. 209-212.
16. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Metod postroeniya statisticheskikh portretov pri realizatsii bezetalonnogo sposoba obrabotki i analiza meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov [The method of constructing statistical portraits when implementing a non-etalon method of processing and analyzing medical X-ray and tomographic images], *Sb. materialov XVI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Informatsionnyye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravleniye» (ITSAIU-2018)* [Collection of materials of the XVI All-Russian Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists "Information technologies, system analysis and management" (ITSAIU-2018)]. Rostov, Taganrog, 2018, pp. 207-213.

17. Proskuryakov A.V. Realizatsiya bezetalonного sposoba obrabotki meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov dlya diagnostiki zabolevaniy [Implementation of a non-etalon method of processing medical radiographic and tomographic images for the diagnosis of diseases] *Mater. Vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. P'yavchenko «KomTekh-2019»* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "kOmtEch-2019"]. Rostov, Taganrog, 2019, pp. 156 -164.
18. Proskuryakov A.V. Verifikatsiya sostoyaniya fragmentov biologicheskikh ob"ektov po kom'yuterno-tomograficheskim izobrazheniyam [Verification of the state of fragments of biological objects by computer tomographic images], *Mater. Vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. P'yavchenko «KomTekh-2019»* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "kOmtEch-2019"]. Rostov, Taganrog, 2019, pp. 169-175.
19. Proskuryakov A.V. Sintez informatsionnoy sistemy verifikatsii fragmentov meditsinskikh biologicheskikh ob"ektov dlya diagnostiki zabolevaniy na baze metodov sistemno-kontseptual'nogo podkhoda [Synthesis of an information system for verifying fragments of medical biological objects for the diagnosis of diseases based on methods of a system-conceptual approach], *Sb. materialov XVII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie» (ITSAiU-2019)* [Collection of materials of the XVII All-Russian Scientific Conference of Students, postgraduates and young scientists "Information technologies, system analysis and management" (ITSAiU-2019)]. Rostov, Taganrog, 2019, pp. 207-213.
20. Proskuryakov A.V. Meditsinskaya avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya dlya diagnostiki zabolevaniy s ispol'zovaniem verifikatsii sostoyaniya fragmentov mediko-biologicheskikh ob"ektov po komp'yuterno-tomograficheskim izobrazheniyam [Medical automated information system for decision-making support for the diagnosis of diseases using verification of the state of fragments of biomedical objects using computed tomographic images], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2020, No. 3, pp. 55-60.

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

Проскуряков Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: avproskuryakov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371673; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; старший преподаватель.

Proskuryakov Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: avproskuryakov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the department of mathematical support and computer application; senior lecturer.

УДК 681.03.245

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-212-225

В.В. Золотарев, А.О. Поважнюк, Е.А. Маро

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LIVENESS DETECTION*

Биометрические системы идентификации и контроля доступа содержат методы распознавания личности субъекта на основе уникальных физиологических и поведенческих характеристик. Целью данной работы является разработка системы безопасного взаимодействия (аутентификации) участников геймифицированных образовательных проектов, включающая в себя противодействие угрозам безопасности, возникающим при использова-

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-013-00711.

нии биометрических характеристик пользователей. Выполнен сравнительный анализ эффективности распознавания поддельных биометрических образцов методами *liveness detection* на основе выявления подмены образца с помощью фото, видео на дисплее, 3D-модели, маски. В ходе исследования предложен способ применения метода *liveness detection* для внедрения в системы геймифицированной образовательной среды. Предложена модификация метода *liveness detection* (гибридный метод) и спроектирована система биометрической идентификации в реальном времени с использованием предложенного метода. Разработан двухэтапный гибридный метод биометрической идентификации на основе совместного использования пассивных и активных программных методов выявления поддельных биометрических образцов. Метод адаптирован для использования с минимальным количеством дополнительных используемых устройств, единственным сканером биометрических признаков является 2D-камера. Проведено тестирования работы сети видов двухслойный перцептрон, трехслойный перцептрон и сверточная нейронная сеть. Обучение сети проводилось на собственных обучающих примерах. Положение диктора при записи обучающих примеров: расстояние лица от камеры – 60см, режимы записи при повороте головы на 0 (взгляд прямо в камеру), 30 (голова немного повернута в сторону) и 45 (голова сильно повернута в сторону) градусов. По итогам тестирования лучшие показатели распознавания были выявлены у сверточной нейронной сети с 3 сверточными слоями и 1 полносвязным. Получена точность распознавания произнесенного слова до 100% при повороте головы пользователя до 30° и до 70% - при повороте головы пользователя до 45°. При тестировании на выборке, состоящей из 1000 примеров, значение FAR данной системы составило 1%, значение FRR составило 0%.

Биометрические системы идентификации; спуфинг-атаки; определение живучести.

V.V. Zolotarev, A.O. Povazhnyuk, E.A. Maro

METHODS OF IMPROVED USER IDENTIFICATION BASED ON LIVENESS DETECTION TECHNOLOGY

Biometric identification and access control systems contain methods for recognizing a subject's personality based on his unique physiological and behavioral characteristics. The purpose of this work is to develop a system for secure interaction (authentication) of participants in gamified educational projects, which includes countering security threats that arise when using biometric user characteristics. A comparative analysis of the efficiency of recognition of fake biometric samples by liveness detection methods based on the detection of sample substitution using a photo, video on a display, a 3D model, and a mask has been performed. During research a method of using the liveness detection for include to a gamified educational environment system was proposed. A modification of the liveness detection method (hybrid method) has been proposed and a biometric identification system in real time has been designed using the proposed method. A two-stage hybrid biometric identification method has been developed based on the joint use of passive and active software methods for detecting fake biometric samples. The method is adapted for use with a minimum number of additional devices, the only biometric feature scanner is a 2D-camera. The network of types two-layer perceptron, three-layer perceptron and convolutional neural network was tested. The network was trained on the author's training examples. The position of the announcer when recording training examples: the distance of the face from the camera is 60cm, the recording modes when the head is turned by 0 (look directly into the camera), 30 (the head is slightly turned to the side) and 45 (the head is turned strongly to the side) degrees. Based on the testing results, the best recognition rates were found in a convolutional neural network with 3 convolutional layers and 1 fully connected one. Accuracy of recognition of the spoken word is obtained up to 100% when the user's head is turned up to 30° and up to 70% - when the user's head is turned up to 45°. The FAR value of this system was 1%, the FRR value was 0% for testing on 1000 samples.

Biometric identification systems; spoofing attacks; liveness detection.

Введение. В зависимости от реализации способов проверки соответствия проверяемого пользователя зарегистрированному, могут быть применены способы взлома биометрической системы: при идентификации по голосу злоумышленником могут быть представлены записи, сгенерированные на основе полученных

образцов голоса пользователя. При идентификации по изображению лица злоумышленником могут быть представлены фотографии и видеозаписи пользователя, полученные непосредственно от него или из общедоступных источников, социальных сетей; изъятые или скопированные с устройств пользователя (мобильного телефона, персонального компьютера); маски из бумаги или специальных материалов; 3D-модели головы и др. [1, 2].

Живучесть (Liveness) – качество или признаки жизни субъекта, выявленные анатомическими характеристиками, произвольными реакциями, физиологическими функциями, добровольными реакциями, или поведением субъекта [3]. Liveness detection представляют собой методы, применяемые для усиления процедуры идентификации и защиты от взлома в биометрических системах идентификации и контроля доступа [4–6].

Известной проблемой в данном случае является угроза похищения аккаунта через подмену изображением считываемого с камеры лица пользователя, и, соответственно, взлом системы аутентификации. Для геймифицированных сред характерны требования безопасности, определяемые с учетом особенностей систем электронного обучения и сервисов-поставщиков образовательного контента.

На этапе обработки биометрического признака, поступающего с камеры или иного устройства считывания, может быть применены различные методы атак, например, может проводиться многократное сканирование биометрического признака (при неограниченном числе попыток возможно ложное определение и пропуск злоумышленника), Подделка биометрического признака (изменение собственных биометрических характеристик с целью имитации биометрических данных зарегистрированного пользователя, предоставления ранее записанных на специальные носители биометрических данных зарегистрированного пользователя).

Атаки, в которых биометрические данные реального пользователя системы подменяются мошенником с помощью поддельных идентификаторов, называются спуфингом [7]. Таким разновидностям атак противодействуют методы проверки признака жизни – liveness detection.

Liveness detection технологии. Технологии liveness detection – методы повышения безопасности систем распознавания, в задачу которых входит проверка идентификатора на принадлежность «живому» пользователю. Технологии liveness detection могут быть адаптированы для анализа различных биометрических показателей: отпечатка пальца, голоса, лица и др.

Для дальнейшей работы в качестве ключевого биометрического признака выбрано изображение лица, так как при этом не требуется непосредственного контакта с оборудованием (сканерами). Далее будут рассмотрены методы определения «признака жизни» лица человека, находящегося перед камерой, в режиме реального времени.

Распознавание лица – распространенный метод аутентификации, использование которого возможно с устройствами, содержащими камеру (мобильный телефон, ноутбук, компьютер с веб-камерой, банкомат и др.), но аутентификация на основе распознавания лиц без применения дополнительных средств проверки является уязвимой для атак злоумышленников. Изображение лица человека легче получить, чем другие биометрические идентификаторы, такие как отпечаток пальца или радужная оболочка. Любая фотография пользователя, полученная путем съемки крупным планом без согласия пользователя или из Интернета, социальных сетей, может быть использована для обмана системы.

Различными исследователями уже проводилась работа над созданием решений по реализации методов liveness detection. Они направлены на то, чтобы отличить лицо живого человека от распечатанной фотографии, маски или видеозаписи.

В работе [8] представлен метод, позволяющий отличить фотографию или видео от настоящего человеческого лица. В процессе проверки выявляется, что поверхность фотографии – плоскость, а поверхность лица – сложная 3D-текстура, для чего используется дорогостоящее оборудование – оптико-электронная система Vestra 3D, содержащая источники света и комплекс камер. Другое решение с использованием анализа 3D-текстур представлено в устройстве iPhone X, оснащённом инфракрасной камерой, извлеченные данные с которой обрабатываются сверточной нейронной сетью [9]. Однако подобные подходы не являются универсальными, так как требуют применения дорогостоящего оборудования, которое не всегда может применяться в системах биометрической идентификации с точки зрения экономической целесообразности, поэтому стоит рассмотреть разработки в данной области, предполагающие применение доступных 2D-камер.

В работе [10] представлено решение на основе анализа качества изображения. Входящее изображение переводится в серый цветовой режим (на выходе изображение I), к нему применяется фильтр Гаусса (на выходе изображение \hat{I}). Вычисляются различия между характеристиками I и \hat{I} (среднеквадратичная ошибка, коэффициент шума, разницы границ, углов и др.). Предполагается, что показатель потери качества после применения фильтра Гаусса различается для «настоящих» (биометрический признак живого человека) и «ложных» (фотография, видеовоспроизведение) изображений. Метод уязвим к атаке 3D-модели.

Метод с использованием анализа текстур изложен в работе [11], где исследователи выявляют различие текстур настоящего лица и распечатанной фотографии с помощью LBP (Local Binary Patterns) метода – представления пикселей изображения в виде бинарных чисел, зависящих от интенсивности соседних пикселей. Выявляются LBP-векторы, которые различаются в зависимости от текстуры поверхности фиксируемого камерой изображения.

Предложен и метод повышения защищенности биометрической системы с помощью анализа фокуса, то есть выявления особенностей фокусировки камеры на настоящем человеческом лице или фотографии [12].

В работе [11] выражено предположение о том, что обнаружение фотографии в кадре может быть установлено при помощи анализа движений, так как движение человеческого лица отличается от принципов движения 2D-объекта. Анализировались оптические потоки, генерируемые 3D и 2D объектами и выявлено, что перемещения, повороты и движение точек объектов в числовом виде давали идентичные результаты, а сокращения (движение мышц лица) являлись признаком различия данных объектов. Метод уязвим к атаке представления видеозаписи лица.

Исследования в работе [13] посвящены анализу таких неконтролируемых движений, как моргание глаз: исследуются длительность, частота, случайность или преднамеренность моргания, статистические закономерности появления данного движения. Для данных методов применима следующая атака: на распечатанной фотографии подлинного пользователя злоумышленник вырезает глаза, прикладывая данную маску к своему лицу, имитирует моргание.

В работе [14] предлагается использование активного метода liveness detection, когда пользователю предоставляется задание проследить за анимацией, движущейся по экрану. Камерой фиксируется реакция пользователя, с помощью алгоритма Виолы-Джонса обнаруживаются лицо и глаза в кадре, выделяются опорные точки глаз (центры зрачков, края глаза), которые впоследствии используются для интерпретации реакции пользователя на задание и правильности выполнения. Анализируются отклонения траектории движения центров зрачков от заданной траектории. Выявлено, что данные показатели реального пользователя, выполняющего задание, значительно меньше, чем злоумышленника, показывающего

камере фотографию и пытающегося выполнить задание и повторить траекторию, передвигая изображение. Однако у злоумышленника есть вероятность успешно пройти аутентификацию. FAR = 13,3%.

В работе [15] представлен метод анализа движения губ при выполнении пользователем чтения чисел. Анализируется движение ключевых точек рта. Используется метод опорных векторов SVM [16] – линейный алгоритм, используемый в задачах классификации. Обучающими примерами служат видео-фрагменты произношения человеком вслух чисел от 0 до 9. Недостатком метода является ограниченность словаря, что позволяет злоумышленнику имитировать выполнение данного задания: к примеру, путем обмана пользователя получить видеозапись, на которой субъект произносит число; извлечь фрагмент произношения числа из существующих видео, находящихся в открытом доступе (интервью в социальных сетях, записи речи, выступления человека). Вероятность получить подходящее задание довольно высока, так как их всего 10. Злоумышленник не ограничен в том, чтобы перезапустить программу проверки и ожидать попадания нужного задания, для которого имеется вырезанный фрагмент.

В работе [17] предлагается отличать реального человека от фотографии и видеозаписи с помощью СНС – сверточной нейронной сети. Используется СНС AlexNet для получения векторов признаков изображения и метод опорных векторов SVM для классификации.

Существуют и другие разработки методов liveness detection на базе нейронных сетей, например, в работе [18] с помощью СНС анализируется способность субъекта моргать. Предполагается, что моргать может только живой человек (данная реализация не содержит защиты от представления видео в качестве поддельного идентификатора).

Сравнение возможностей распознавания методов приведено в табл. 1. Задача состоит в том, чтобы выбрать или создать модификацию метода, позволяющего закрыть максимальное количество уязвимостей, выполняющего все критерии распознавания, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов liveness detection

Метод	Возможность распознать фото	Возможность распознать видео на дисплее	Возможность распознать 3D-модель	Возможность распознать человека в маске
Анализ 3D-текстур [8]	+	+	-	+
Анализ 3D-текстур [8], инфракрасная камера [9]	+	+	+	+
Анализ качества изображения [9]	+	+	-	-
Анализ 2D-текстур [11]	+	+	-	-
Анализ фокуса [12]	+	+	-	-
Анализ моргания [13]	+	-	+	-
Активное взаимодействие [14, 15]	+	-	+	-

В разрабатываемой биометрической системе идентификации предполагается осуществить комплексный подход к анализу получаемой информации и предотвратить максимальное количество возможностей реализации угроз применением гибридного метода liveness detection.

С помощью предложенного метода можно идентифицировать ложное изображение пользователя: фото, видео на экране устройства, проверить 3D-объект – является ли человеческим лицом или 3D-моделью (3D-маской). Однако возможен обход системы при представлении системе маски с вырезанной областью рта и возможностью злоумышленника использовать это для выполнения задания. Возможное решение: анализ дополнительных точек лица и их движения относительно друг друга. Выявление зависимостей между движением точек при перемещении в кадре статичного объекта (распечатанной фотографии, маски) и динамичного – настоящего лица.

Гибридный метод liveness detection. Для того, чтобы исключить максимальное количество возможных способов проведения спуфинг-атак, предлагается использовать двухэтапный гибридный метод биометрической идентификации и совместить пассивные и активные программные методы. Для первоначального выявления текстуры предоставленного идентификатора используется сверточная нейронная сеть. Сетью анализируются выделенные в кадре параметры изображения – таким образом, производится анализ его цветовой палитры и качества.

На данном этапе определяется, находится ли в кадре некий субъект или видеозапись (или фотография) на экране планшета/смартфона. На данном этапе невозможно различить среди субъектов реального человека, цветную фотографию на бумаге, маску и 3D-маску, так как при фиксации их камерой качество изображения такое же, как при фиксации реального человеческого лица, в отличие от изображения на экране планшета/смартфона, которое при фиксации камерой будет иметь сниженное качество, измененные структуру и цвет изображения, блики.

Если выявлено, что в кадре зафиксирована не фотография или видеозапись на экране устройства, проверяется, находится ли в кадре человек или цветная бумажная фотография, 3D-модель или маска, при помощи анализа возможности выполнить задание. Алгоритм принятия решения показан на рис. 1.

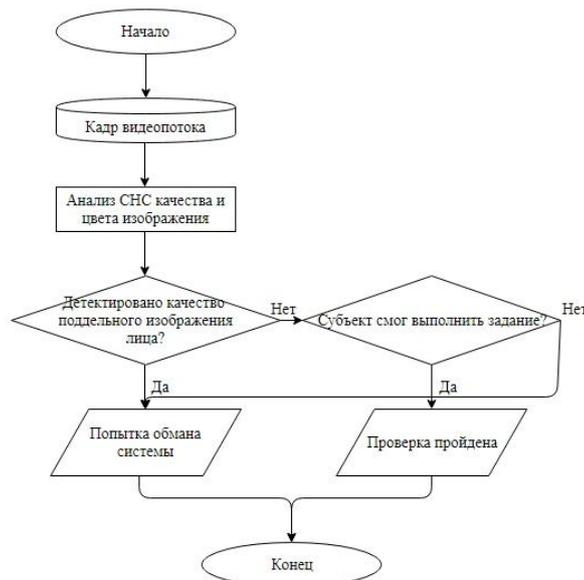


Рис. 1. Алгоритм принятия решения

Предполагается добиться улучшенных результатов по сравнению с результатами, представленными в приведенных ранее работах [8, 9, 11–15], или выявить рекомендации по улучшению проектируемой системы.

Реализация идентификации с поддержкой технологии *liveness detection*.

Система представляет собой программный модуль, который реализует функции проверки признака жизни лица пользователя.

Для работы системы необходимо наличие камеры, которая будет фиксировать действия пользователя: ноутбук с встроенной камерой или персональный компьютер с подключенной веб-камерой.

Функции системы:

- ◆ обработка данных в режиме реального времени;
- ◆ идентификация пользователя без использования дополнительных сканеров биометрических идентификаторов (инфракрасных, термальных, 3D-камер);
- ◆ работа на различных платформах операционных систем.

Модуль первоначального распознавания признака «жизни» основан на предварительно обученной сверточной нейронной сети (СНС) и заключается в проведении анализа параметров изображения в каждый момент времени. Предлагается использовать реализацию данной СНС, предложенную в работе [19].

Используемая для классификации изображений в данной реализации СНС состоит из 4 сверточных слоев и 2 полносвязных. Используемую СНС необходимо предварительно обучить. Данные, подаваемые на вход СНС для обучения – изображения реальных пользователей из папки «real» или фотографии и видео пользователей, отображаемые на экране смартфона из папки «fake». Для получения собственных обучающих примеров необходимо снять несколько видео, отображающих реальных пользователей или фотографии и видео пользователей, отображаемые на экране смартфона. Схема формирования обучающего набора приведена на рис. 2.

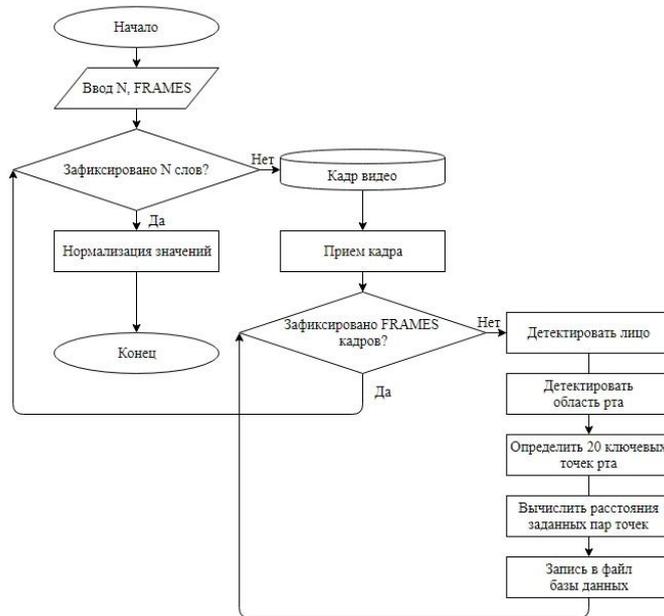


Рис. 2. Алгоритм создания обучающих примеров

С использованием специального модуля программы видео разбивается на кадры, в которых детектируется область лица и сохраняется в формате .png в папке «real» или «fake» соответственно. Для выполнения разбиения видеозаписей на кадры и сохранения изображений лиц в качестве параметра передаются названия видео и папок, в которые сохраняются изображения, а также частота – будут ли сохраняться изображения со всех кадров или пропуская некоторое количество (например, через каждые 4 кадра).

Также применена Dlib [20] – библиотека алгоритмов машинного обучения, содержащая средства распознавания лиц. С использованием средств данной библиотеки будут определяться границы лица в кадре и фиксироваться ключевые точки лица. Из данной библиотеки используется предварительно обученная модель для выделения 68 ключевых точек лица (рис. 3).

Метод адаптирован для использования с минимальным количеством дополнительных используемых устройств, единственным сканером биометрических признаков является 2D-камера (веб-камера, встроенная камера ноутбука, камера смартфона). Для использования разработанной программы необходимо наличие камеры с характеристиками:

- ◆ число мегапикселей матрицы не менее, чем 0,3;
- ◆ частота кадров не менее 20 Гц.

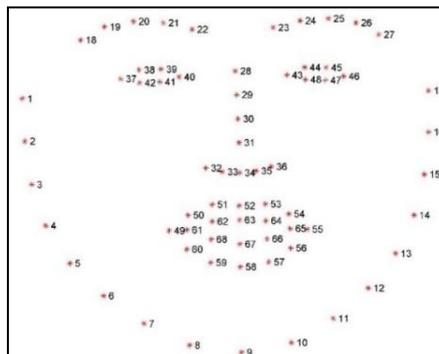


Рис. 3. 68 ключевых точек лица

Для записи обучающих примеров и контроля работы системы используется камера Dialog WC-05U (разрешение 640x480; 0,3 мегапикселей; скорость записи до 30 кадров/сек).

Использование метода liveness detection в целевых задачах. Предложенный метод может применяться в системах биометрической идентификации в условиях минимизации количества дополнительных используемых устройств для контроля доступа пользователя к ресурсам системы.

Данная разработка предназначена для использования в системе геймифицированной образовательной среды, включающей групповое взаимодействие пользователей различных ролей. Обычно в образовательных системах не используется двухфакторная аутентификация или другие дополнительные методы проверки пользователя, и используется проверка по логину и паролю. Пользователь может быть обманут злоумышленником посредством проведения социально-инженерных атак, может умышленно или неумышленно передать парольную или другую важную информацию для аутентификации. Для повышения защищенности аккаунтов пользователей предложено использовать биометрическую идентификацию и аутентификацию (с согласия пользователя). Использование биометрической иденти-

фикации позволяет обеспечивать безопасность взаимодействия участников и защиту аккаунтов и авторской информации; исключает возможность проведения злоумышленником социально-инженерной атаки.

Основным преимуществом использования биометрической идентификации является минимальный риск потери, кражи, взлома или подделки ключевой информации при условии повышения безопасности процедуры идентификации с использованием выбранного метода *liveness detection*; избавление пользователя от необходимости запоминать или хранить парольную информацию, так как для идентификации используется биометрический признак – лицо пользователя.

Для использования в системе геймифицированной образовательной среды предлагается 2 варианта распознавания пользователя по лицу:

- а) система аутентификации;
- б) система верификации.

В первом случае пользователи предварительно регистрируются в системе (регистрируется лицо и уникальное имя), база данных хранит в некотором виде признаки лица и соответствующее имя. При прохождении процедуры аутентификации пользователь предъявляет только свое лицо на камеру. Производится перебор вариантов и определение, кем является представленный камере пользователь. Системой предоставляется ответ: логин обнаруженного пользователя либо «пользователь не обнаружен».

Во втором случае пользователи также предварительно регистрируются в системе (регистрируется лицо и уникальное имя), база данных хранит в некотором виде признаки лица и соответствующее имя. При прохождении процедуры верификации пользователь первоначально предъявляет свое имя (логин), после чего представляет лицо камере. Производится сравнение признаков только с одним набором данных, соответствующем представленному логину. Системой предоставляется ответ «да/нет» (соответствуют ли признаки пользователя зарегистрированным).

Второй вариант является более быстрым, особенно при большом количестве зарегистрированных пользователей.

Получение задания и доказательство «живучести» в процессе активного взаимодействия производится после получения логина от подсистемы аутентификации или положительного ответа от подсистемы верификации, и позволяет пользователю получить доступ к аккаунту. На данном этапе также работают алгоритмы текстурного анализа.

Предложенная модификация метода выбрана таким образом, чтобы исключить максимальное количество возможностей проведения попыток взлома и предоставления поддельных биометрических идентификаторов.

Применение технологии *Liveness Detection*. В каждый момент времени должны анализироваться поступающие кадры. Выполняется первоначальное определение, является ли представленный идентификатор фотографией или видео. Процесс идентификации прерывается, если в данный момент проверка показывает, что представлены фото или видео.

Если проверка пройдена (не распознаны фото или видео данные), но в кадре распознано лицо, следовательно, в качестве идентификатора представлено реальное человеческое лицо, маска или 3D-маска. Чтобы среди этих объектов произвести проверку, живой ли человек в кадре, выдается задание произнести определенное слово и проверяется способность субъекта справиться с этим заданием. Возможность подмены идентификатора в процессе исключается, если параллельно с проверкой выполнения задания продолжает работать первый модуль, средства проверки качества изображения.

Кадры, на которых детектируется область лица, вырезаются и сохраняются в формате .png как изображение в папках «real» или «fake» соответственно. Изображения подаются на вход СНС уменьшенными до размеров 32x32. Сеть состоит из 4 сверточных слоев и 2 полносвязных. Производится обучение на данном множестве примеров и сохранение обученной модели.

Реализация функции обнаружения лица и выделения ключевых точек занимают определенное время, из-за чего обрабатываются не все поступающие от камеры кадры, но их количества достаточно для выделения значимой информации.

В качестве значащей информации, отражающей особенности произношения слов, предложено использовать расстояние между точками рта человека. Набор таких значений будет обрабатываться нейронной сетью для принятия решения, было ли верно выполнено задание, что позволяет уменьшить количество обрабатываемых нейронной сетью параметров по сравнению с методом [19], в котором анализируются все значения координат всех точек. Также метод [19] принуждает проводить дополнительную нормализацию значений координат в случае, когда положение фиксируемого субъекта отличается от ожидаемого (имеют место отклонения головы от нормального положения, повороты), в то время как расстояния не имеют зависимости от положения головы в пространстве, кроме случая отдаления от камеры или приближения к ней. При приближении/отдалении лица от камеры расстояния между точками рта изменяются пропорционально, следовательно, достаточно вычислить коэффициент, определяющий это изменение, и увеличивать/уменьшать с его помощью обрабатываемые значения.

Специальная функция позволяет определить коэффициент, используемый для выравнивания значений расстояний между точками рта. Сравнивается расстояние между двумя крайними точками рта пользователя с эталонным расстоянием между крайними точками рта диктора, записывавшего обучающие примеры. Для вычисления расстояний между точками используется формула Евклидова расстояния.

Обучение сети проводилось на собственных обучающих примерах. Положение диктора при записи обучающих примеров: расстояние лица от камеры – 60см, режимы записи при повороте головы на 0 (взгляд прямо в камеру), 30 (голова немного повернута в сторону) и 45 (голова сильно повернута в сторону) градусов. Для тестирования на данном этапе выбраны 2 слова с четко различимыми фонемами: «жимолость», «параплан». Обучающая выборка содержит 100 примеров – по 50 примеров произношения этих слов.

За время произношения диктором слова фиксируется определенное количество кадров (15 кадров – каждые 0.2сек) за заданное время. В каждом кадре получено 16 значений расстояний между точками рта. Таким образом, произношение одного слова представлено матрицей значений 15x16. Для нормализации значений в пределах [0,1] применяется линейная нормализация – формула (1).

$$\tilde{x}_{ik} = \frac{x_{ik} - x_{min_i}}{x_{max_i} - x_{min_i}}. \quad (1)$$

Нейронная сеть реализована средствами библиотеки keras. Было принято решение реализовать и протестировать нейронные сети архитектур многослойный перцептрон и сверточную нейронную сеть, выбрать сеть с лучшими показателями эффективности работы (точность и скорость распознавания).

Перцептрон с двумя слоями, 50 обучающих примеров. В качестве функции активации в слоях используется ReLU – возвращает значение x, если x положительно, и 0 в противном случае. Применение ReLU повышает скорость сходимости градиентного спуска [21] по сравнению с сигмидой и гиперболическим тангенсом.

В качестве функции активации последнего полносвязного слоя используется функция мягкого максимума softmax (2).

$$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^N e^{z_k}}, \quad (2)$$

где z_i – значение на выходе из i -го нейрона до активации, а N – общее количество нейронов в слое.

Для улучшения показателей принято решение добавить дополнительный полносвязный слой и расширить обучающую выборку до 100 примеров.

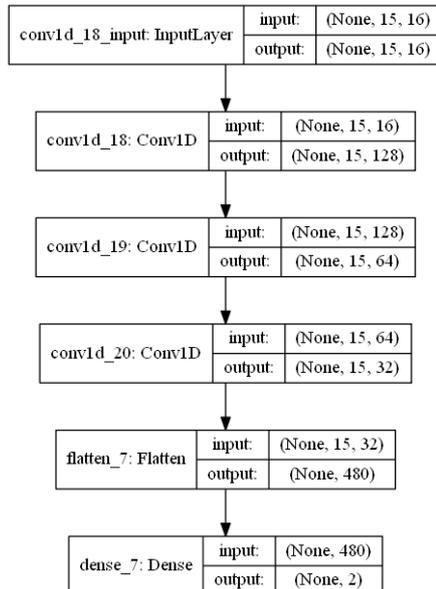
Результаты тестирования работы сети видов двуслойный перцептрон, трехслойный перцептрон и сверточная нейронная сеть приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тестирование сети вида двуслойный перцептрон, трехслойный перцептрон и сверточная нейронная сеть

Параметр	Значение для двуслойного перцептрона (50 обучающих примеров)	Значение для перцептрона с тремя слоями (100 обучающих примеров)	Значение для сверточной нейронной сети
Средняя точность распознавания среди тестовых данных	92,00%	96,00%	96,00%
Среднее время распознавания произношения пользователя	0,0001 сек	0,0001 сек	0,0001 сек
Тест 0101011000, 0° (средняя точность распознавания)	80%	90%	100%
Тест 0101011000, 30° (средняя точность распознавания)	80%	90%	100%
Тест 0101011000, 45° (средняя точность распознавания)	70%	80%	70%
Тест 0001111100, 0° (средняя точность распознавания)	80%	90%	100%
Тест 0001111100, 30° (средняя точность распознавания)	80%	80%	100%
Тест 0001111100, 45° (средняя точность распознавания)	60%	80%	70%

По результатам тестирования лучшие показатели распознавания имеет третий вариант сети – СНС с 3 сверточными слоями и 1 полносвязным. Архитектура данной сети приведена на рис. 4.



Наименование слоев:

1. Conv1D – сверточный слой;
2. Flatten – слой преобразования двумерного вектора признаков в одномерный;
3. Dense – полносвязный слой.

Рис. 4. Архитектура выбранной сверточной нейронной сети

Заключение. В работе предложена модификация метода liveness detection (гибридный метод) и спроектирована система биометрической идентификации в реальном времени с использованием предложенного метода для задач геймифицированного обучения. По итогам тестирования лучшие показатели распознавания были выявлены у сверточной нейронной сети с 3 сверточными слоями и 1 полносвязным. Получена точность распознавания произнесенного слова до 100% при повороте головы пользователя до 30° и до 70% – при повороте головы пользователя до 45°. Для данной системы по результатам тестирования выявлены значения FAR и FRR при тестировании на 1000 примерах. Значение FAR данной системы составило 1%, значение FRR составило 0%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ ISO/IEC 19794-1-2015. Информационные технологии (ИТ). Биометрия. Форматы обмена биометрическими данными. Ч. 1. Структура; введ. 01.07.2016. – М.: ФГУП «СтандартИнформ», 2016. – 25 с.
2. PSA: Your Note 8's Face Unlock can easily be fooled / Sean Hollister. – URL: cnet.com/news/samsung-note-8-fooled-face-unlock-not-secure.
3. Единая биометрическая система. Методические рекомендации по удаленной идентификации для руководителей проектов. Версия 1.0. – URL: https://bio.rt.ru/upload/iblock/4ba/MR-po-udalennoy-identifikatsii-dlya-rukovoditeley-proektov_v1.0.docx.
4. Shweta Policepatil, Sanjeevakumar M. Hatture Face Liveness Detection: An Overview // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. – 2021. – URL: <https://ijsrst.com/paper/8266.pdf>.
5. Chen H., Chen Y., Tian X. and Jiang R. A Cascade Face Spoofing Detector Based on Face Anti-Spoofing R-CNN and Improved Retinex LBP // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 170116-170133. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2955383.

6. Yousef A., Yaojie L., Amin J., Xiaoming L. Face anti-spoofing using patch and depth-based CNNs // 2017 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB). – 2017. – P. 319-328.
7. Trader J. Liveness Detection to Fight Biometric Spoofing // M2SYS Blog: сайт. A KernelIO Company, 2017. – URL: m2sys.com/blog/scanning-and-efficiency/liveness-detection-fight-biometric-spoofing.
8. Lagorio A., Tistarelli M., Cadoni M., Fookes C., Sridharan S. Liveness detection based on 3d face shape analysis // Conf. on Biometrics and Forensics (IWBF), April 2013.
9. Face ID Security, Apple Inc. – URL: apple.com/business-docs/FaceID_Security_Guide.pdf.
10. Galbally J., Marcel S. Face Anti-Spoofing Based on General Image Quality Assessment // Conf. on Pattern Recognition (ICPR), January 2014.
11. Kim G., Eum S., Suhr J.K., Kim D.I., Park K.R., Kim J. Face Liveness Detection Based on Texture and Frequency Analyses // 5th IAPR International Conference on Biometrics (ICB), 2012. School of Electrical and Electronic Engineering. – Yonsei University, Republic of Korea, 2012. – 6 с.
12. Kim S., Ban Y., Lee S. Face Liveness Detection Using Defocus // Department of Electrical and Electronic Engineering. – Yonsei University, Korea, 14 Jan, 2015. – P. 1537-1563.
13. Jee H.-K., Jung S.-U., Yoo J.-H. Liveness detection for embedded face recognition system // International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. – 2008. – Vol. 2, No: 6. – P. 2142-2145.
14. Ali A., Deravi F., and Hoque S. Liveness detection using gaze collinearity // Proc. IEEE Int. Conf. Emerg. Secur. Technol. (ICEST), Sep. 2012. – P. 62-65.
15. Kollreider K., Fronthaler H., Faraj M.I., and Bigun J. Real-time face detection and motion analysis with application in “liveness” assessment // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2007. – 2 (3-2). – P. 548-558.
16. Воронцов К.В. Лекции по методу опорных векторов. – URL: ccas.ru/voron/download/SVM.pdf.
17. Волкова С.С., Матвеев Ю.Н. Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи противодействия атаке спуфинга в системах лицевой биометрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 702-710.
18. Eetveldt J.V. Real-time face liveness detection with Python, Keras and OpenCV // Towards Data Science, 2019. – URL: <https://towardsdatascience.com/real-time-face-liveness-detection-with-python-keras-and-opencv-c35dc70dafd3>.
19. Rodebrock A. Pyimagesearch // Author archive. – URL: <https://www.pyimagesearch.com/author/adrian>.
20. Dlib C++ Library. – URL: <http://dlib.net/>.
21. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Article in Advances in neural information processing systems, January 2012. – 9 p.

REFERENCES

1. GOST ISO/IEC 19794-1-2015. Informatsionnye tekhnologii (IT). Biometriya. Formaty obmena biometricheskimi dannymi. Ch. 1. Struktura; vved. 01.07.2016 [GOST ISO / IEC 19794-1-2015. Information technology (IT). Biometrics. Biometric data exchange formats. Part 1. Structure; entered 01.07.2016]. Moscow: FGUP «StandartInform», 2016, 25 p.
2. PSA: Your Note 8's Face Unlock can easily be fooled, Sean Hollister. Available at: cnet.com/news/samsung-note-8-fooled-face-unlock-not-secure.
3. Edinaya biometricheskaya sistema. Metodicheskie rekomendatsii po udalenoj identifikatsii dlya rukovoditeley proektov. Versiya 1.0 [Unified biometric system. Methodological recommendations for remote identification for project managers. Version 1.0]. Available at: https://bio.rt.ru/upload/iblock/4ba/MR-po-udalenoj-identifikatsii-dlya-rukovoditeley-proektov_v1.0.docx.
4. Shweta Policepatil, Sanjeevakumar M. Hatture Face Liveness Detection: An Overview, *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 2021. Available at: <https://ijsrst.com/paper/8266.pdf>.
5. Chen H., Chen Y., Tian X. and Jiang R. A Cascade Face Spoofing Detector Based on Face Anti-Spoofing R-CNN and Improved Retinex LBP, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 170116-170133. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2955383.

6. Yousef A., Yaojie L., Amin J., Xiaoming L. Face anti-spoofing using patch and depth-based CNNs, *2017 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*, 2017, pp. 319-328.
7. Trader J. Liveness Detection to Fight Biometric Spoofing, *M2SYS Blog: caim. A KernelIO Company*, 2017. Available at: m2sys.com/blog/scanning-and-efficiency/liveness-detection-fight-biometric-spoofing.
8. Lagorio A., Tistarelli M., Cadoni M., Fookes C., Sridharan S. Liveness detection based on 3d face shape analysis, *Conf. on Biometrics and Forensics (IWBF)*, April 2013.
9. Face ID Security, Apple Inc. Available at: apple.com/business-docs/FaceID_Security_Guide.pdf.
10. Galbally J., Marcel S. Face Anti-Spoofing Based on General Image Quality Assessment, *Conf. on Pattern Recognition (ICPR)*, January 2014.
11. Kim G., Eum S., Suhr J.K., Kim D.I., Park K.R., Kim J. Face Liveness Detection Based on Texture and Frequency Analyses, *5th IAPR International Conference on Biometrics (ICB)*, 2012. School of Electrical and Electronic Engineering. Yonsei University, Republic of Korea, 2012, 6 с.
12. Kim S., Ban Y., Lee S. Face Liveness Detection Using Defocus, *Department of Electrical and Electronic Engineering. Yonsei University, Korea*, 14 Jan, 2015, pp. 1537-1563.
13. Jee H.-K., Jung S.-U., Yoo J.-H. Liveness detection for embedded face recognition system, *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2008, Vol. 2, No: 6, pp. 2142-2145.
14. Ali A., Deravi F., and Hoque S. Liveness detection using gaze collinearity, *Proc. IEEE Int. Conf. Emerg. Secur. Technol. (ICEST)*, Sep. 2012, pp. 62-65.
15. Kollreider K., Fronthaler H., Faraj M.I., and Bigun J. Real-time face detection and motion analysis with application in “liveness” assessment, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2007, 2 (3-2), pp. 548-558.
16. Vorontsov K.V. Lektsii po metodu opornykh vektorov [Support vector machine lectures]. Available at: ccas.ru/voron/download/SVM.pdf.
17. Volkova S.S., Matveev Yu.N. Primenenie svertochnykh neyronnykh setey dlya resheniya zadachi protivodeystviya atake spufinga v sistemakh litsevoy biometrii [Application of convolutional neural networks for solving the problem of countering spoofing attacks in facial biometrics systems], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2017, Vol. 17, No. 4, pp. 702-710.
18. Eetveldt J.V. Real-time face liveness detection with Python, Keras and OpenCV, *Towards Data Science*, 2019. Available at: <https://towardsdatascience.com/real-time-face-liveness-detection-with-python-keras-and-opencv-c35dc70dafd3>.
19. Rodebrock A. Pyimagesearch, *Author archive*. Available at: <https://www.pyimagesearch.com/author/adrian>.
20. Dlib C++ Library. Available at: <http://dlib.net/>.
21. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *Article in Advances in neural information processing systems*, January 2012, 9 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.А. Кытманов.

Золотарев Вячеслав Владимирович – Сибирский государственный университет науки и технологий; e-mail: amida.2@yandex.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: 83912227639; к.т.н.; доцент.

Поважнюк Алина Олеговна – e-mail: alina.l22@mail.ru; тел.: 83912227639.

Маро Екатерина Александровна – Южный федеральный университет; e-mail: eamaro@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371905; к.т.н.; доцент.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – Siberian State University of Science and Technology; e-mail: amida.2@yandex.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +73912227639; cand. of eng. sc.; associate professor.

Povazhnyuk Alina Olegovna – e-mail: alina.l22@mail.ru; phone: +73912227639.

Maro Ekaterina Aleksandrovna – Southern Federal University; e-mail: eamaro@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371905; cand. of eng. sc.; associate professor.

С.Л. Беляков, И.Н. Розенберг, Н.А. Голова, К.С. Яворчук

ЗНАНИЯ ДЛЯ АРГУМЕНТАЦИИ ПРИ СОПОСТАВЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ*

Традиционно применяемым способом оценки качества решения, которое предлагается интеллектуальной системой, является объяснение хода логического вывода. Знания о рассуждениях применяются для аргументации выбора варианта решения. Последовательность примененных правил, использованные факты и подтвержденные гипотезы считаются аргументами, которые должны убедить пользователя в справедливости сформированного заключения. Недостатком подобного способа объяснения является то, что он отражает формально верный, но лишенный смыслового наполнения ход рассуждений. Аргументация полученного решения основывается на протоколе трассировки, по сути ничем не отличающегося от отладочной информации при трассировке программ. Аргументация в таком случае далека от смысла ситуации. Под смыслом понимается заданный набор преобразований ситуации, сохраняющих неизменность ее восприятия человеком-аналитиком. Знания о смысловом содержании ситуаций должны представляться специальной моделью. В данной работе рассматривается представление, содержащее прецедент и его допустимые преобразования. В такой форме описываются пространственные ситуации в геоинформационных системах. Для аргументации предлагается использовать специальные отношения между образами ситуаций. Вводится понятие области применимости образа. Взаимное расположение пространственно-временной и семантической оболочки образов и областей их применимости рассматривается как носитель отношения. Сведения об отношениях извлекаются из структуры картографической базы данных. Рассматриваются отношения наследования, агрегирования, композиции, генерализации и ассоциации классов объектов. Знания для аргументации представляются правилами определения показателя достоверности экспертного вывода для отдельных отношений и их сочетаний. Предлагается способ автоматической генерации правил. Приводятся соотношения для сравнения уровней достоверности правил.

Интеллектуальные геоинформационные системы; ситуационный анализ; перенос знаний; принятие решений.

S.L. Belyakov, I.N. Rosenberg, N.A. Golova, K.S. Yavorchuk

KNOWLEDGE FOR ARGUMENTATION IN COMPARISON OF SPATIAL SITUATIONS

The traditionally used way to assess the quality of the solution proposed by an intelligent system is to explain the course of logical inference. Knowledge about reasoning is used to argue the choice of a solution option. The sequence of applied rules, the facts used and the confirmed hypotheses are considered arguments that should convince the user of the validity of the formed conclusion. The disadvantage of this method of explanation is that it reflects a formally correct, but devoid of semantic content, course of reasoning. The argumentation of the solution obtained is based on the tracing protocol, which is essentially no different from debugging information when tracing programs. The argumentation in this case is far from the meaning of the situation. The meaning is understood as a given set of transformations of the situation that preserve the immutability of its perception by a human analyst. Knowledge about the semantic content of situations should be presented in a special fashion. In this paper, we consider a representation containing a precedent and its permissible transformations. In this form, spatial situations in geoinformation systems are described. For argumentation, it is proposed to use special relations between images of situations. The concept of the area of applicability of the image is introduced. The mutual ar-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00197.

rangement of the spatial-temporal and semantic shell of images and the areas of their applicability is considered as a carrier of the relationship. Information about relationships is extracted from the structure of the cartographic database. The relations of inheritance, aggregation, composition, generalization and association of classes of objects are considered. Knowledge for argumentation is provided by the rules for determining the reliability index of expert conclusion for individual relationships and their combinations. A method of automatic rule generation is proposed. The relations for comparison of levels of reliability of rules are given.

Intelligent geoinformation systems; situational analysis; knowledge mining; decision making.

Введение. Выработка решений на основе пространственного анализа ситуаций занимает важное место среди широкого круга задач принятия решений. Инструментом принятия решений являются пространственные данные и знания геоинформационных систем (ГИС). Основной проблемой выработки адекватных решений в проблемных ситуациях остается неоднозначность и неопределенность состояния реального мира. Традиционным для пространственного анализа является подход, основанный на построении и анализа образов ситуаций. Образ ситуации представляет собой картографическое описание ситуации, которое в интерактивном режиме визуально и инструментально изучается пользователем-аналитиком. Сопоставление образа проблемной ситуации и образов ранее изученных ситуаций моделирует процесс разумного принятия решений: если образы близки, то имеющийся опыт принятия решения можно перенести на текущую проблему. В этом процессе важную роль играет оценка обоснованности сравниваемых вариантов решений. Нахождение аргументов «за» и «против» конкретного варианта решения и их взвешенное сравнение позволит выработать представление о его достоверности.

В данной работе изучается задача представления знаний, позволяющих обосновывать решения.

Известные подходы к аргументации решений. Задача абстрактной аргументации в процессе рассуждений исследуется в логике много лет [1, 2]. Предметом исследования является построение логического вывода в условиях, когда имеются аргументы различной значимости и каждый из них особым образом соотносится с другими. Отношения между аргументами образуют сложную структуру, требующую специальных подходов к логическому выводу. Отметим, что исследования абстрактной аргументации предполагают, что число и значимость аргументов известны. Однако, этот вопрос не решается просто. Выявление аргументов в пространственном анализе ситуаций не приводит к однозначному результату из-за субъективности оценок [3]. Актуален поиск объективных методов нахождения аргументов и их значимости.

Инструментарий пространственного анализа ГИС [4] дает возможность организовать единый гибридный интеллектуальный процесс визуального и картографического изучения пространства. Генерация и выбор вариантов решений реализуется путем поиска и компоновки тематической карты области анализа. Ее содержание через профессиональное восприятие картографических объектов и отношений порождает суждения, обоснованность которых чаще строится через аргументацию и применение немонотонной логики [5, 6]. Программные инструменты ГИС дают возможность не только манипулировать пространственными данными, но и получать от эксперта-аналитика знания пространственного характера. Этот механизм недостаточно изучен и является предметом исследования. Результаты открывают перспективу повышения качества принимаемых решений.

Работы в области построения и использования онтологий непосредственно связаны с представлением знаний о пространственных ситуациях [7, 8]. Отношения между концептами в заданном контексте анализа позволяют строить интеллектуальные процедуры поиска и генерализации. При этом дескрипционная логика

вывода в онтологиях не позволяет непосредственным образом получать обоснование решений в пространственных ситуациях. В онтологию предметной области достаточно проблематично включать знания об аргументированном обосновании конкретных решений. Поэтому задача адекватного представления знаний для обоснования нуждается в исследовании.

Прецедентный анализ (CBR) является известным методом поиска решений путем оценки их близости в пространстве ситуаций [9,10]. Центральным механизмом CBR является использование метрики оценки близости ситуаций. Выбор метрики, адекватной реальности, представляет собой сложную задачу и предполагает наличие экспертного обоснования [11]. Это обоснование невозможно использовать как объяснение того, почему было выбрано то или иное решение в конкретной ситуации. Обоснованием решения не может служить объяснение принятого формализма. По этой причине необходим анализ возможности привлечения к CBR аргументов, характеризующих ситуацию со смысловой точки зрения.

Образы пространственных ситуаций и зоны их применимости. Под образом ситуации (I) будем понимать подмножество объектов и отношений, имеющих в ГИС (Ω) [12]. В образ включают две разновидности элементов – скелетон (B) и окружение (E). К скелетону относятся объекты и отношения, существенно важные для понимания и идентификации смысла решаемой задачи. Окружение включает в себя объекты и отношения, необходимые для целостного представления сущностей скелетона:

$$I \subseteq \Omega, I = B \cup E, B \neq \emptyset, B \cap E = \emptyset. \quad (1)$$

Знание о поведении и динамике ситуаций не ограничивается их описанием в форме образов (1). Существенную роль играет знание о том, как известная ситуация может выглядеть в другой местности. Функция трансформирования реализует отображение образа x в образ y в заданной пространственной области w

$$y = f_{TR}(x, w). \quad (2)$$

Здесь f_{TR} – функция трансформирования [13]. В данной работе мы считаем ее известной. По форме это может быть набор правил, по которым картографические объекты и отношения отображаются в заданную область соответственно ее топологии. Используя (2), образ проблемной ситуации (I_p) может сравниваться с трансформированным образом любой другой известной ситуации (I_{TR}). Степень близости оценивается некоторой метрикой $d(I_a, I_b)$. Поиск наиболее близкого образа в данном случае реализует идею прецедентного анализа [11].

Применение знаний путем их трансформирования должно основываться на знаниях о возможности и способах трансформирования. Наличие в информационной базе ГИС описания топологии целевой области никогда не является полным, что ограничивает применение формальных процедур трансформирования. Адекватным способом отображения подобных знаний для ГИС следует считать зонирование (районирование), применяемое в географии [14–18]. Зонирование относится к аналитическим операциям ГИС и ставит своей целью выделение пространственных областей, обладающих заданными свойствами. Карты зонирования носят обобщающий характер и рассматриваются как генерализация некоторой тематической карты. Для ситуационного анализа зона применимости образа – это область карты с атрибутами, определяющими границы «разумного» применения знаний, инкапсулированных в конкретном образе. Разумность в этом случае связывается с возможностью обосновать результат трансформирования. Обоснование основано на двух предположениях:

- ◆ если целевая область трансформирования находится внутри зоны образа, результат процедуры трансформирования считается подтвержденным экспертом;

- ◆ если целевая область трансформирования не находится внутри зоны образа, результат трансформирования формально корректен, но не подтвержден экспертом.

Из указанного следует, что наиболее обоснованным следует считать решение для ситуации, находящейся в описанной экспертом зоне применимости образа. Отсутствие зонирования позволяет генерировать ГИС минимально обоснованные решения.

Зонирование, с нашей точки зрения, должно играть важную роль в повторном использовании опыта экспертов. В пользу данного утверждения говорит следующее:

- ◆ опыт наблюдения ситуаций всегда локален. Возникающий образ расширяет ментальные границы наблюдаемого, однако перенос опыта на другие ситуации должен базироваться на знаниях о реальном мире. По сути, эти знания должны отражать возможность применения конкретного образа в других областях пространства;

- ◆ знание о возможности применения образа не может выводиться из знания о самом образе. Трансформирование – это механизм отображения, который также должен иметь обоснование, следующие из опыта. Эксперты обладают таким знанием, и это способствует принятию разумных решений. Перенос подобных мета-знаний в ГИС также должен способствовать повышению качества решений;

- ◆ если экспертом указана зона возможного применения образа, в ней возникает возможность особой трактовки экземпляров ситуаций, которые не соответствуют критерию качества трансформирования. Особая интерпретация состоит в том, что любая трансформированная ситуация возможна внутри границ зоны и после дополнения некоторыми элементами может рассматриваться как достаточно достоверная. На практике на этом строится процесс коллективной выработки решений: «гупиковая» ситуация преодолевается согласованием субъективного видения решения отдельными участниками «мозгового штурма». Знания и опыт каждого индивидуума порождают образ с отличающейся трансформацией прецедента. Данный факт не говорит о противоречии, а свидетельствует о возможности генерации синтетических решений при условии одинаковой оценки возможности применения опыта в анализируемой области пространства;

- ◆ пересечение зон возможного применения образов может рассматриваться как область коллективного принятия решений. Кроме сравнения и отбора вариантов решения возникает возможность их комбинирования и порождения новых синтетических, имеющих то же смысловое содержание.

Формально если $R \subseteq \Omega$ представляет анализируемую область, то ее зонирование – нахождение покрытия

$$R = \bigcup_i w_i(Q^*),$$

$$Q^* \subseteq X^n \rightarrow Q,$$

где w_i – зона на карте, Q есть множество значений критерия выделения зон, X – множество параметров критерия, подмножество значений параметров Q^* отражает содержательный смысл зоны [19]. Каждая зона описывается двумя компонентами: образом (I_k) и картографической областью его применения (r_k):

$$w_i = \langle I_k, r_k \rangle.$$

Рассмотрим отношения между зонами с точки зрения достоверности применения связываемых с зонами знаний. Оценка достоверности заключений, полученных на основе применения знаний, является ключевой проблемой работы интел-

лектуальных систем. В рассматриваемом случае речь должна идти о сопоставлении образов и их трансформировании при наличии определенных топологических отношений между зонами. Наличие того или иного отношения должно использоваться как аргумент в пользу или против утверждений о близости сопоставляемых ситуаций.

Отношения между зонами опишем в терминах, принятых в объектном подходе. Классически знания о пространственных объектах представляют в терминах геометрической топологии [20]. Недостатком такого способа является игнорирование атрибутивных данных, значительно расширяющих представление о смысле ситуаций. Площадь, форма, протяженность границы местности далеко не всегда отражает суть происходящего. По этой причине целостное знание, которое вкладывается экспертом, следует оценивать с позиций абстрагирования, принятого в объектном подходе.

Отношения и аргументация. Под аргументацией будем понимать классическое определение [21]: «Аргументация – процесс доказательства истинности утверждения с привлечением фактов, из которых следует истинность данного утверждения, или которое увеличивает уверенность в его истинности». Аргументация может строиться по одному из следующих принципов:

- ◆ поиска утверждений, фактов или гипотез, способных подтвердить или опровергнуть рассматриваемое предположение;
- ◆ оценки достоверности предположения, исходя из имеющегося набора аргументов, используя некоторую специальную логику аргументации;
- ◆ применения формальной теории аргументации, в которую включены аксиомы, определяющие некоторые значения достоверности, и правила оценивания аргументированных заключений. Логика вывода считается заданной.

Рассматривая аргументацию, будем иметь в виду первый принцип. Описания образов и зоны их применения неявно содержат в себе все необходимые аргументы, оценка достоверности которых строится на логике, устанавливаемой отношениями между зонами применимости образов.

Первая аксиома, которую необходимо принять, состоит в том, что минимальной достоверностью обладает сопоставление образов, ни для одного из которых не указана зона применимости. Дополнительная аргументация в таком случае отсутствует. Формально, используя обозначения метрики близости образов $P(I_a, I_b)$ и достоверности их сопоставления $V(P(I_a, I_b))$, можно записать правило логического вывода

$$\forall w_a, w_b: r_a = r_b = \emptyset \Rightarrow V(P(I_a, I_b)) = V_{min},$$

где V_{min} является минимально возможным уровнем достоверности сопоставления.

Отношение наследования между парой зон $R_{inh}(w_a, w_b)$ возникает, когда одна из них в определенном смысле «обобщает» вторую. Примером может быть зона чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть в технологической системе предприятия. Зона включает в себя зоны чрезвычайных ситуаций, потенциально возможных в территориально распределенных подсистемах. При явной специфике отдельных технологических операций и факторов опасности существуют общие для всей системы угрозы, которые проявляются единым образом.

Образ, соответствующий базовой зоне, генерализует образ производной зоны на том же уровне масштабирования карты, что формально выражается как а его картографическая область покрывает область производной зоны:

$$\forall w_a, w_b \in R_{in}(x, y) \Rightarrow r_a \subseteq r_b.$$

Важно, что $r_a \subseteq r_b$, поскольку в противном случае существовали бы области, в которых образы не наследуют свойства базовой области. Соответственно, если

$$r_a \cap r_b \neq \emptyset,$$

возникает случай неполной генерализации, когда существуют образы, не поддающиеся обобщению.

Отношение наследования может быть единичным или множественным, т.е. представляться как $R_{inh}(x_1, x_2, \dots, x_m, y)$. В последнем случае производная зона должна покрываться всеми базовыми зонами:

$$\forall w_a, w_{b_1}, w_{b_2}, \dots, w_{b_m} \in R_{насл}(x_1, x_2, \dots, x_m, y) | r_a \subseteq r_{b_i}, i = \overline{1, m}.$$

Чтобы оценить достоверность сопоставления образа проблемной ситуации I_p с образом I_a из базы знаний ГИС, рассмотрим варианты относительного расположения проблемного образа (рис. 1).

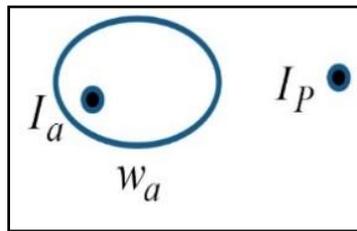


Рис. 1. Образ I_p вне зоны применения I_a

Если I_p вне зоны применимости I_a , то его трансформирование в область образа I_p не порождает дополнительных свидетельств и достоверность остается на уровне V_{min} . Правило логического вывода для этого случая:

$$I_p \notin w_a \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_{min}.$$

При попадании в зону применимости I_a появляется свидетельство эксперта, что порождает правило

$$I_p \in w_a \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_{ins},$$

причем $V_{ins} \geq V_{min}$.

При наследовании может иметь место попадание либо в базовую, либо в производную зону (рис. 2). Если I_p попадает в базовую область, на него распространяется экспертное утверждение обобщающего характера. Поскольку оно не затрагивает определенные детали ситуации, можно утверждать, что

$$I_p \in w_b \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_g, V_{in} \geq V_g \geq V_{min}.$$

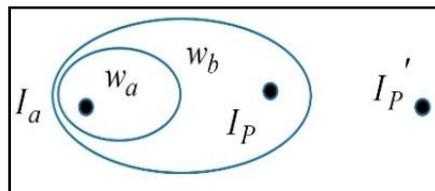


Рис. 2. Случай наследования зон

Что касается достоверности образа I_p , попадающего в зону применимости I_a , то ее более высокое значение может быть аргументировано экспертным утверждением обобщающего характера, которое относится к I_a . Таким образом,

$$I_p \in w_a \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_g', V_{in} \leq V_g'.$$

При множественном наследовании количество свидетельств растет

$$I_p \in \bigcap_i w_{b_i} \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_g'', V_g' \leq V_g''.$$

Отношение агрегирования $R_{agr}(w_a, w_b)$ между зонами возникает в том случае, когда эксперт утверждает, что в агрегирующей области w_a с высокой достоверностью возникают разнородные ситуации, которые ранее наблюдались и хорошо изучены. Подобно агрегированию, можно рассматривать единичное и множественное агрегирование.

В отличие от наследования, агрегируемые образы не обладают сходными наборами параметров. Вместе с тем, убедительность аргументации при агрегировании выше по причине его практичности: наблюдение экспертом реально произошедших ситуаций различающейся природы позволяют ему без каких-либо обобщений аргументировать принятие решения.

Примером агрегирования является включение в зоны, опасные для проживания, зон промышленного загрязнения, пожаров, наводнений, и т.д.

Формально агрегирование так же, как и наследование, требует включения зон. Если w_a агрегирует w_b , то:

$$\forall w_a, w_b \in R_{agr}(x, y) \Rightarrow r_a \supseteq r_b.$$

Попадание в агрегирующую зону позволяет выдвинуть более убедительные аргументы по сравнению со случаем наследования:

$$I_p \in w_a \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_a, V_a \geq V_g.$$

Соответственно, нахождение в зоне применимости агрегированного образа усиливает аргументацию:

$$I_p \in w_b \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_a', V_a' \geq V_g'.$$

Попадание I_p в области применимости нескольких образов оставляет аргументацию на прежнем уровне из-за того, что агрегированные образы разнородны:

$$I_p \in \bigcap_i w_{b_i} \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_a'', \\ V_a' = V_a''.$$

Отношение композиции $R_{comp}(w_a, w_b)$ является частным случаем агрегирования и возникает между зонами в том случае, когда эксперт утверждает, что композирующая и композируемая зоны объединены тесными причинно-следственными связями и не могут существовать раздельно. Например, зона проекта поставки товаров и комплектующих агрегирует зоны приобретения и производства, при этом каждая из них тесно связана друг с другом в контексте проекта и не имеет смысла по отдельности. С точки зрения аргументации подобная взаимозависимость нежелательна. Смысловая близость частных ситуаций компрометируется специфичностью общего смысла образа. Поэтому введя обозначение

$$\forall w_a, w_b \in R_{comp}(x, y) \Rightarrow r_a \supseteq r_b$$

$$I_p \in w_a \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_{comp},$$

$$V_a = V_{комп}, V_a' \geq V_{комп}', V_a'' \geq V_{комп}''.$$

Здесь $V_{комм}'$ соответствует единичной композиции, $V_{комм}''$ – множественной.

Отношение ассоциации $R_{assoc}(w_a, w_b)$ возникает при использовании параметров одной зоны для вычисления параметров другой. Например, опыт планирования ремонта участка транспортной сети использует опыт ремонта моста, аналогичного имеющемуся. При этом опыт обслуживания ремонта моста зафиксирован как самостоятельный образ, привязанный к конкретной местности. Ассоциативные отношения не накладывают ограничений на взаимное расположение зон. В то же время, любое пересечение может аргументировать повышение достоверности:

$$\begin{aligned} & \forall w_a, w_b \in R_{assoc}(x, y), \\ & I_p \in w_a \vee I_p \in w_b \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_{assoc}, \\ & I_p \in w_a \wedge I_p \in w_b \Rightarrow V(P(I_p, I_a)) = V_{assoc}. \end{aligned}$$

Заключение. Обоснование принятого решения в проблемной пространственной ситуации наиболее убедительно, если выполняется в виде аргументированных утверждений. Такой подход в большей степени соответствует разумному диалогу двух сторон, чем перечисление выполнившихся правил-продукций или описание использованной метрики оценки сходства ситуаций. Учитывая совершенство процедур абстрактной аргументации, авторам представляется важным находить содержательные источники аргументов. Для области анализа и принятия решений в пространственных ситуациях таким источником может быть совокупность отношений, отражающих топологию метазнаний экспертов. В данной работе такими метазнаниями является применимость ранее принятых решений. Полученные соотношения для оценки достоверности аргументов являются основой для нечетких логических рассуждений.

Дальнейшие исследования поставленной проблемы могут быть направлены на поиск более сложных структур аргументов, отражающих пространственные ситуации и их представление картографическими образами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *John L. Pollock* Defeasible Reasoning. Reasoning: Studies of Human Inference and its Foundations, ed. Jonathan Adler and Lance Rips. – Cambridge University Press, 2006.
2. *Dung Phan Minh*. On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games // Artificial Intelligence. – 1995. – Vol. 77 (2).
3. *Luca Longo, Lucas Rizzo, Pierpaolo Dondio*. Examining the modelling capabilities of defeasible argumentation and non-monotonic fuzzy reasoning // Knowledge-Based Systems. – 2021. – Vol. 211.
4. *Zhou W.* GIS for Earth Sciences / In: D. Alderton, S. Elias eds. Encyclopedia of Geology (Second Edition). – Academic Press, 2021.
5. *Lijun Wei, Heshan Du, Quratul-ain Mahesar, Kareem Al Ammari, Derek R. Magee, Barry Clarke, Vania Dimitrova, David Gunn, David Entwisle, Helen Reeves, Anthony G. Cohn*. A decision support system for urban infrastructure inter-asset management employing domain ontologies and qualitative uncertainty-based reasoning // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 158.
6. *Nguyen Duy Hung, Van-Nam Huynh*. Revealed preference in argumentation: Algorithms and applications // International Journal of Approximate Reasoning. – 2021. – Vol. 131. – P. 214-251.
7. *Thiago Sobral, Teresa Galvão, José Borges*. An Ontology-based approach to Knowledge-assisted Integration and Visualization of Urban Mobility Data // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 150.
8. *Hafidha Bouyerbou, Kamal Bechkoum, Richard Lepage*. Geographic ontology for major disasters: Methodology and implementation // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2019. – Vol. 34. – P. 232-242.

9. *Bannour W., Maalel A., Ghezala H.H.B.* Case-based Reasoning for Crisis Response: Case Representation and Case Retrieval // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 176. – P. 1063-1072. – DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.102.
10. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Kacprzyk J., Rozenberg I.* Intelligent Planning of Spatial Analysis Process Based on Contexts. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1197. – P. 10-17 DOI: 10.1007/978-3-030-51156-2_2.
11. *Delu Wang, Kaidi Wan, Wenxiao Ma.* Emergency decision-making model of environmental emergencies based on case-based reasoning method // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 262. – 110382.
12. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Зубков С.А. [и др.]*. Трансформирование опыта принятия решений в пространственных ситуациях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 5 (215). – С. 159-171.
13. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.* The intuitive cartographic representation in decision-making // *World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science*. – 2016. – Vol. 10. – P. 13-18.
14. *Верещака Т.В., Баканова М.Ю.* Особенности технологии создания (обновления) специализированных топографических карт нефтегазового назначения // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 678-688.
15. *Кресникова Н.И., Васильевых Н.А.* Применение данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для обеспечения территориального планирования // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 212-217.
16. *Паламарчук Н.А.* Зонирование территорий города // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. – 2013. – № 7 (103). – С. 48-52.
17. *Александров А.А.* Моделирование взрывоопасности и зонирование территории при хранении жидкого углеводородного топлива по критериям риска / под ред. В.И. Ларионова. – Уфа: Изд-во: БЭСТС, 2004.
18. *Демьянов В.В., Савельева Е.А.* Геостатистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010.
19. *Тихунов В.С.* Классификации в географии: ренессанс или увядание?: (Опыт формал. классификаций). Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – М.; Смоленск: Изд-во Смол. гос. ун-та, 1997.
20. *Galton A.* Spatial and temporal knowledge representation // *Earth Sci Inform*. – 2009. – Vol. 2. – P. 169-187. – DOI: 10.1007/s12145-009-0027-6.
21. *Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А.* Толковый словарь по искусственному интеллекту. – Радио и связь, 1992.

REFERENCES

1. *John L. Pollock* Defeasible Reasoning. Reasoning: Studies of Human Inference and its Foundations, ed. Jonathan Adler and Lance Rips. Cambridge University Press, 2006.
2. *Dung Phan Minh.* On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games, *Artificial Intelligence*, 1995, Vol. 77 (2).
3. *Luca Longo, Lucas Rizzo, Pierpaolo Dondio.* Examining the modelling capabilities of defeasible argumentation and non-monotonic fuzzy reasoning, *Knowledge-Based Systems*, 2021, Vol. 211.
4. *Zhou W.* GIS for Earth Sciences, In: D. Alderton, S. Elias eds. *Encyclopedia of Geology* (Second Edition). Academic Press, 2021.
5. *Lijun Wei, Heshan Du, Quratul-ain Mahesar, Kareem Al Ammari, Derek R. Magee, Barry Clarke, Vania Dimitrova, David Gunn, David Entwisle, Helen Reeves, Anthony G. Cohn.* A decision support system for urban infrastructure inter-asset management employing domain ontologies and qualitative uncertainty-based reasoning, *Expert Systems with Applications*, 2020, Vol. 158.
6. *Nguyen Duy Hung, Van-Nam Huynh.* Revealed preference in argumentation: Algorithms and applications, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2021, Vol. 131, pp. 214-251.
7. *Thiago Sobral, Teresa Galvão, José Borges.* An Ontology-based approach to Knowledge-assisted Integration and Visualization of Urban Mobility Data, *Expert Systems with Applications*, 2020, Vol. 150.

8. *Hafidha Bouyerbou, Kamal Bechkoum, Richard Lepage.* Geographic ontology for major disasters: Methodology and implementation, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, Vol. 34, pp. 232-242.
9. *Bannour W., Maalel A., Ghezala H.H.B.* Case-based Reasoning for Crisis Response: Case Representation and Case Retrieval, *Procedia Computer Science*, 2020, Vol. 176, pp. 1063-1072. DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.102.
10. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Kacprzyk J., Rozenberg I.* Intelligent Planning of Spatial Analysis Process Based on Contexts, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1197, pp. 10-17. DOI: 10.1007/978-3-030-51156-2_2.
11. *Delu Wang, Kaidi Wan, Wenxiao Ma.* Emergency decision-making model of environmental emergencies based on case-based reasoning method, *Journal of Environmental Management*, 2020, Vol. 262, 110382.
12. *Belyakov S.L., Belyakova M.L., Zubkov S.A. [i dr.].* Transformirovanie opyta prinyatiya resheniy v prostranstvennykh situatsiyakh [Transformation of decision-making experience in spatial situations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2020, No. 5 (215), pp. 159-171.
13. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.* The intuitive cartographic representation in decision-making, *World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science*, 2016, Vol. 10, pp. 13-18.
14. *Vereshchaka T.V., Bakanova M.Yu.* Osobnosti tekhnologii sozdaniya (obnovleniya) spetsializirovannykh topograficheskikh kart neftegazovogo naznacheniya [Features of the technology for creating (updating) specialized topographic maps for oil and gas purposes], *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotos"emka» [Izvestia of universities "Geodesy and aerial photography"]*, 2019, Vol. 63, No. 6, pp. 678-688.
15. *Kresnikova N.I., Vasil'evykh N.A.* Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya i geoinformatsionnykh tekhnologiy dlya obespecheniya territorial'nogo planirovaniya [Application of remote sensing data and geoinformation technologies to ensure territorial planning], *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotos"emka» [Izvestia of universities "Geodesy and aerial photography"]*, 2018, Vol. 62, No. 2, pp. 212-217.
16. *Palamarchuk N.A.* Zonirovanie territoriy goroda [Zoning of city territories], *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel' [Land management, cadastre and land monitoring]*, 2013, No. 7 (103), pp. 48-52.
17. *Aleksandrov A.A.* Modelirovanie vzryvoopasnosti i zonirovanie territorii pri khraneni zhidkogo uglevodorodnogo topliva po kriteriyam riska [Modeling of explosion hazard and zoning of the territory during storage of liquid hydrocarbon fuel according to risk criteria], ed. by V. I. Larionova. Ufa: Izd-vo: BESTS, 2004.
18. *Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A.* Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: Theory and Practice], ed. by R.V. Arutyunyan; In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN. Moscow: Nauka, 2010.
19. *Tikunov V.S.* Klassifikatsii v geografii: renessans ili uvyadanie?: (Opyt formal. klassifikatsiy) [Classifications in geography: Renaissance or withering?: (Formal experience. classifications)]. oscar State University named after M.V. Lomonosov. Moscow; Smolensk: Izd-vo Smol. gos. un-ta, 1997.
20. *Galton A.* Spatial and temporal knowledge representation, *Earth Sci Inform.*, 2009, Vol. 2, pp. 169-187. DOI: 10.1007/s12145-009-0027-6.
21. *Averkin A.N., Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A.* Tolkovyy slovar' po iskusstvennomu intellektu [Explanatory dictionary on artificial intelligence]. Radio i svyaz', 1992.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.К. Самойлов.

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: beliacov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Голова Никита Александрович – e-mail: ngolova@sfedu.ru; аспирант.

Яворчук Кирилл Сергеевич – e-mail: kyavorchuk@sfedu.ru; аспирант.

Розенберг Игорь Наумович – АО «НИИАС»; e-mail: i.yarosh@vniias.ru; г. Москва, Россия; научный руководитель АО «ВНИИАС»; профессор.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: beliacov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371695; the department of information and analytical security system; professor.

Golova Nikita Alexandrovich – e-mail: ngolova@sfedu.ru; graduate student.

Yavorchuk Kirill Sergeevich – e-mail: kyavorchuk@sfedu.ru; graduate student.

Rosenberg Igor Naumovich – JSC "NIAS"; e-mail: i.yarosh@vniias.ru; Moscow, Russia; scientific supervisor of JSC "VNIAS"; professor.

УДК 658.51.011.5:664.6

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-236-249

Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян, А.Я. Номерчук

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

В настоящее время в связи с повсеместной компьютеризацией разработка систем автоматизированного управления является актуальной. В связи с развитием малого бизнеса приобретение промышленно выпускаемых систем является весьма дорогостоящим решением. Возможно создание аналогичных систем управления на основе недорогих микропроцессорных комплектов (в данном конкретном случае используется микропроцессорный комплект K1816VE35). В дальнейшем подобную систему нетрудно будет усовершенствовать, а также легко реализовать сопряжение с различными электронно-вычислительными машинами (управление с персонального компьютера). Разработке подлежит система измерения и регулирования сыпучего сырья (система автоматизированного взвешивания), обеспечивающая управление автоматикой пневмотранспорта с 2-х скоростным ротационным дозатором, посредством которого сыпучее сырье подается на весовой бункер, подвешенный на тензодаточное устройство. Измерения веса сыпучей массы в бункере весов, с последующим управлением автоматикой выгрузки сыпучего сырья из бункера. Рентабельность любой промышленной операции, включающей взвешивание сырья, незавершенного производства и готовой продукции, напрямую зависит от точности данных о весе. Однако даже при использовании высокоточного оборудования для взвешивания метод сбора, записи и обработки данных о весе для системы микро ингредиентов может быть подвержен ошибкам и неточностям. Это может вызвать потенциальную утечку доходов, которую трудно обнаружить и проверить. Во многих случаях предполагается, что причина проблемы связана с весовым оборудованием, тогда как на самом деле это связано с традиционной системой сбора данных и управления. На многих заводах, где смешивают сыпучие продукты партиями, дозирование весов представляет собой ручную, трудоемкую операцию, при которой ингредиенты взвешиваются по отдельности перед загрузкой в blender или другую технологическую емкость. Значительное количество таких заводов может выиграть от установки автоматизированной системы взвешивания и дозирования.

Фильтр Кальмана; процесс взвешивания; моделирование процесса; взвешивающий конвейер; математическая модель.

E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan, A.Ya. Nomerchuk

EVALUATION OF THE STATE OF DYNAMIC WEIGHING BY THE KALMAN FILTER METHOD

Currently, due to widespread computerization, the development of automated control systems is relevant. Due to the development of small businesses, the purchase of commercially available systems is a very expensive solution. It is possible to create similar control systems based on inexpensive microprocessor kits (in this particular case, the K1816VE35 microprocessor kit is used). In the future, such a system will not be difficult to improve, and it is also easy to implement

interfacing with various electronic computers (control from a personal computer). A system for measuring and regulating bulk raw materials (an automated weighing system) is to be developed, which provides control of the pneumatic transport automation with a 2-speed rotary dispenser, through which bulk raw materials are fed to a weighing hopper suspended on a load-bearing device. Measuring the weight of the bulk mass in the hopper of the scales, followed by automatic control of unloading of bulk raw materials from the hopper. The profitability of any industrial operation involving the weighing of raw materials, work in progress and finished products directly depends on the accuracy of the weight data. However, even when using high-precision weighing equipment, the method of collecting, recording and processing weight data for the micro ingredients system may be subject to errors and inaccuracies. This can cause a potential revenue drain that is difficult to detect and verify. In many cases, it is assumed that the cause of the problem is related to the weighing equipment, whereas in fact it is related to the traditional data collection and management system. In many factories where bulk products are mixed in batches, dosing scales is a manual, time-consuming operation in which the ingredients are weighed separately before loading into a blender or other technological container. A significant number of such plants can benefit from the installation of an automated weighing and dosing system.

Kalman filter; weighing process; process modeling; weighing conveyor; mathematical model.

Введение. В рамках ожидаемого усовершенствования весовой установки требуется уменьшить период выравнивания сигнала, чтобы сигнал достиг устойчивого состояния до того, как будут отобраны данные для оценки веса [1, 2, 6, 15].

Временные ряды данных показаний тензодатчиков представлены от нескольких составляющих с тремя различными скоростями.

Динамическое взвешивание отличается от статического тем, что при статическом взвешивании вес определяется, когда взвешиваемый продукт неподвижен, а при динамическом взвешивании продукты взвешиваются во время их движения. В таких системах взвешивания обычно используются датчики силы. При статическом взвешивании взвешиваемый объект помещается неподвижно на платформу, и для оценки веса используется устойчивое состояние сигнала датчика. Однако при динамическом взвешивании сигнал датчика может не достигать устойчивого состояния в течение короткого времени взвешивания, поэтому вес оценивается, например, путем усреднения нижней части сигнала после его прохождения через фильтр низких частот. Полученные в результате оценки массы могут быть неточными для более тяжелых предметов. Полезно рассмотреть более эффективные способы оценки истинного веса в приложениях высокоскоростного взвешивания.

Предлагаемый метод заключается в использовании алгоритма 1-D фильтра Калмана для оценки оптимального состояния сигнала. Улучшенный сигнал устойчивого состояния затем используется для оценки веса. Предложенный метод был протестирован с использованием данных, собранных с нагрузочной ячейки при прохождении над ней различных грузов. Результаты показывают значительное улучшение качества отфильтрованного сигнала, который затем используется для улучшения оценки веса.

Основная часть. Контрольные весы – это устройство, которое проверяет вес продукции. Оно интегрируется в производственную линию и обычно находится в конце производственной линии (рис. 1). Существует несколько различных конструкций в зависимости от требований к их применению. Основными компонентами контрольных весов являются подающая секция, весовая платформа и выходящая секция [3–10].

Изделия подаются на взвешивающий конвейер с подающего конвейера, на котором обычно установлен датчик силы. Сигнальный процессор получает сигнал от датчика силы и оценивает значение веса для продукта, который проходит через весовой стол.

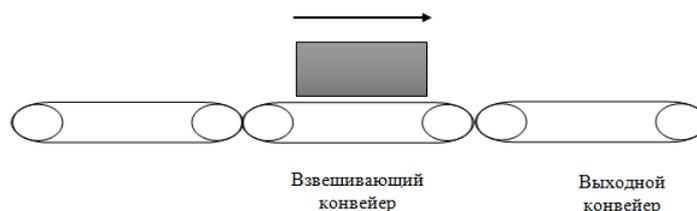


Рис. 1. Расположение контрольных весов

Математическая модель. В существующей системе, продукция перевозится в отдельных контейнерах. Каждый носитель протаскивается через станцию взвешивания, которая оснащена системой с двумя тензодатчиками. Когда продукция перемещается на станцию взвешивания, вес прикладывает силу ($2mg$) к платформе, установленной на двух тензометрических датчиках, как показано на рис. 2

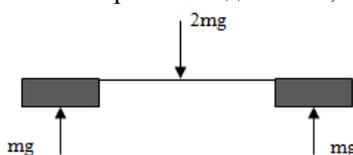


Рис. 2. Схема расположения двойного тензодатчика

Предполагается, что нагрузка распределяется поровну между двумя ячейками нагрузки.

Выходное напряжение тензодатчика усиливается и фильтруется аналоговым фильтром Баттерворта пятого порядка и сэмпляется с частотой около 4 кГц 12-битным «аналого-цифровым преобразователем» (АЦП).

Показания в фильтрованном сигнале усредняются по заданному «окну взвешивания». Это окно составляет определенный процент от полного цикла. Также указано, что текущая система достигает стандартного отклонения повторяемости менее 0,5 при перемещении 200 г со скоростью 10 элементов в секунду.

Моделирование датчика нагрузки. Тензодатчик консольно закреплен для обеспечения гибкости системы. Когда элемент и носитель прикладывают силу веса к тензодатчику, он прогибается и приходит в колебание. В литературе динамика тензодатчиков моделируется, как система пружина-масса-демпфер и математически представлена дифференциальным уравнением второго порядка.

Математическая модель разработана для одного тензодатчика. В модели также предполагается, что между элементом и тензодатчиком нет относительного движения, т.е. элемент, носитель и тензодатчик колеблются как единое целое [8, 11–12].

Входная функция представляет собой ступенчатую функцию с величиной mg , которая составляет половину общего веса элемента.

$$(M + m)x + cx + kx = mg U(t), \quad (1)$$

где c – коэффициент демпфирования, k – пружинная постоянная, m – масса элемента, M – масса оболочки, $U(t)$ – функция единичного шага.

Передаточная функция получается путем преобразования по Лапласу¹ уравнения (1):

¹ Преобразование Лапласа преобразует сигнал во временной области в частотную область, где величина и фаза определяет угол наклона сигнала. Преобразование также преобразовывает дифференциальные уравнения в простые алгебраические.

$$(M + m)(X(s)s^2 - sx(0) - x(0)) + c(sX(s) - x(0)) + kX(s) = mg U(s)$$

Передаточная функция системы:

$$H(s)=X(s)=\frac{mg}{s((M+m)s^2+cs+k)}+\frac{(M+m)(sx(0)+\dot{x}(0))+cx(0)}{s((M+m)s^2+cs+k)}. \quad (2)$$

Используя теорему о начальном значении: $\lim_{t \rightarrow 0} x(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sX(s)$, значение передаточной функции:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} sX(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \left[\frac{mg}{s((M+m)s^2+cs+k)} + \frac{(M+m)(sx(0)+\dot{x}(0))+cx(0)}{s((M+m)s^2+cs+k)} \right] = 0.$$

Используя теорему о конечном значении, $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s)$, значение передаточной функции:

$$\lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[\frac{mg}{s((M+m)s^2+cs+k)} + \frac{(M+m)(sx(0)+\dot{x}(0))+cx(0)}{s((M+m)s^2+cs+k)} \right]$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = \frac{mg}{k}. \quad (3)$$

Эти пределы описывают реакцию системы на ступенчатую функцию при $t = 0$ (начальное значение) и при $t \rightarrow \infty$ (конечное значение). Конечное значение $(\frac{mg}{k})$ также является *устойчивым значением* отклика системы.

Предполагая, что $\dot{x}(0) = 0$, и при $x(0) = 0$, формулу (2) можно переписать как,

$$H_L(s) = \frac{(\frac{mg}{k})\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}, \quad (4)$$

где собственная частота элемента и упаковки, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M+m}}$ коэффициент демпфирования, $\zeta = \frac{c\omega_n}{2k}$.

Поведение ступенчатого отклика во временной области получено с помощью частичных дробей и обратного преобразования Лапласа уравнения (4).

$$x(t) = \frac{mg}{k} - \frac{mg}{k} \frac{(2\zeta\omega_n + 1)}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sqrt{1-\zeta^2}. \quad (5)$$

Отклик во временной области состоит, по сути, из двух частей: постоянной составляющей $\frac{mg}{k}$ и затухающей колебательной составляющей. Отклик внезапно возрастает до постоянного значения $\frac{mg}{k}$. Ожидаемое поведение выхода тензодатчика во временной области, представленное дифференциальным уравнением второго порядка, показано на рис. 3.

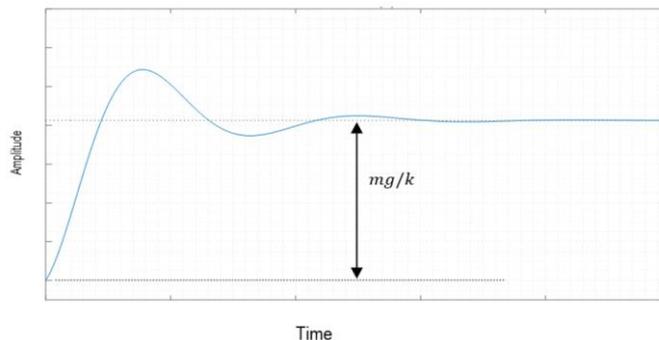


Рис. 3. Ступенчатая реакция на дифференциальное уравнение второго порядка

Фактическое выходное напряжение нефильтрованного сигнала для веса в 200 гр при 0,5 м/с и 573,1 г при 0,5 м/с 1,5 м/с показано на рис. 4,а и 4,б.

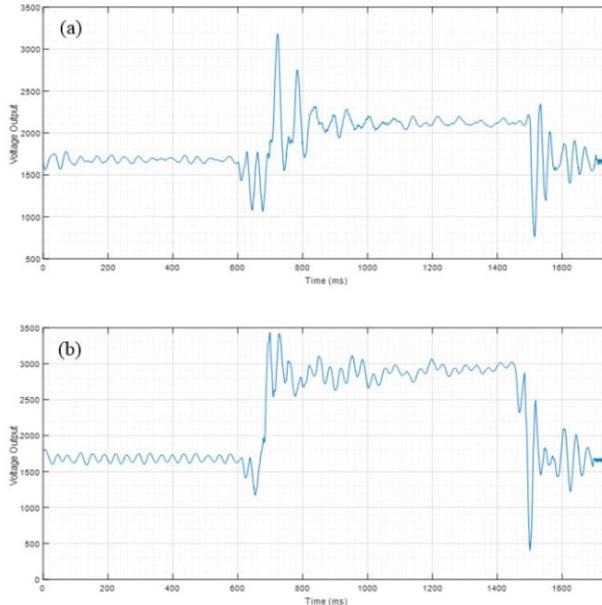


Рис. 4. Отклик тензодатчиков для калиброванной массы 200 г (а) при скорости 0,5 м/с (б) при скорости 1,5 м/с

Графики отклика модели и фактических данных показывают, что значения внезапно возрастают до нового значения (постоянная составляющая значений), где они успокаиваются с течением времени. Модель успокаивается быстрее после двух доминирующих пиков. Нефильтрованные данные для 200 г при скорости 0,5 м/с имеют схожую характеристику с откликом модели, однако наличие дополнительных колебаний заставляет график колебаться вокруг постоянного значения. 573,1 г при 0,5 м/с демонстрирует постоянную составляющую. Сигнал сильно осциллирует в течение всего времени сигнала. Для сравнения, графики фактических данных демонстрируют некоторое сходство с поведением модели с некоторыми отклонениями [13–18].

Уравнение системы второго порядка разработано на основе второго закона Ньютона, поэтому оно точно отражает динамику системы. Отклонение от этой ожидаемой модели подразумевает наличие других элементов, таких как возмущения системы, помехи и другие вибрационные шумы в системе.

Алгоритм фильтра Калмана. Фильтр Калмана – это алгоритм оптимального оценивания, названный в честь Рудольфа Е. Калмана, который разработал этот алгоритм. Рекурсивный алгоритм оптимального оценивания состояния по существу оценивает неизмеренные состояния линейных динамических систем или процессов по зашумленным наблюдениям. Расширения алгоритма были также разработаны для нелинейных систем [7].

Динамика системы, развивающаяся во времени, задается уравнением системы:

$$x_{t+1} = F_t x_t + w_t; w_t \sim N(0, \sigma_w^2),$$

где x_t : вектор состояния в момент времени t . (вектор, подлежащий оценке) ($n \times 1$); F_t : матрица перехода состояния, описывающая влияние текущего состояния x_t на

x_{t+1} , обновленное состояние ($n \times n$); w_t : вектор шума процесса, связанный с x_t ($n \times 1$). Предполагается, что шум процесса является гауссовским с нулевым средним и известной дисперсией σ_w^2 .

Уравнение измерения,

$$y_t = H_t x_t + v_t; v_t \sim N(v_t; 0, \sigma_v^2),$$

где H_t – вектор преобразования, который отображает состояния системы в область измерений ($m \times n$); V_t – матрица шума наблюдения ($m \times 1$), распределенная по гауссовскому распределению с нулевым средним и известной дисперсией σ_v^2 .

v_t и w_t некоррелированы, так что $E[v_j, w_k] = 0$.

Ниже приводится краткое описание алгоритма фильтра Калмана [10, 9–22].

Несмещенной оценкой состояния в момент времени t является \hat{x}_t , а P_t – квадратичная ошибка априорной оценки, т.е. $P_t = E[(\hat{x}_t - x_t)^2]$.

Временные обновления оценок состояния, \hat{x}_{t+1} и P_{t+1} задаются,

$$\hat{x}_{t+1} = F_t \hat{x}_t + K_t (y_t - H_t \hat{x}_t),$$

$$P_{t+1} = (F_t - K_t H_t) P_t F_t^T + \sigma_w^2,$$

где $K_t = F_t P_t H_t^T (H_t P_t H_t^T + \sigma_v^2)^{-1}$.

K_t является наиболее важным параметром фильтра и называется коэффициентом усиления Калмана. Усиление Калмана вычисляется на каждой итерации рекурсивного алгоритма таким образом, чтобы дисперсия новой оценки была минимальной. Когда новое наблюдение y_t становится доступным, вычисляется новая оценка для вектора состояния и вектора дисперсии. Начальные значения вектора состояния x_0 и вектора дисперсии P_0 должны быть определены до реализации фильтра. Однако результаты показывают, что начальные значения не оказывают существенного влияния на результат работы фильтра.

1-D подход с использованием фильтра Калмана В одномерном пространстве состояний система характеризуется скалярными величинами: x_t – оцениваемое состояние; F_t – коэффициент перехода состояния; w_t – шум процесса, связанный с x_t и являющийся скалярной переменной [15–23].

Уравнение измерения

$$y_t = H_t x_t + v_t \sim v_t : N(0, \sigma_v^2),$$

где H_t – коэффициент преобразования, отображающий состояния системы в область измерений; V_t – шум наблюдения, скалярная переменная с нулевым средним и известной дисперсией σ_v^2 .

Уравнение 5, показывает, что отклик системы во временной области состоит из двух компонентов и шума системы. Резкое увеличение значения сигнала отвечает за вес элемента.

В данном подходе основное внимание уделяется получению увеличения значения сигнала с помощью упрощенного режима отклика, как показано ниже.

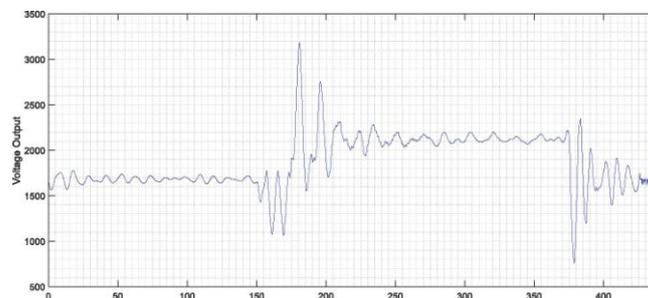


Рис. 5. График нефильтрованных данных для 200 г, движущихся со скоростью 0,5 м/с

Пунктирная линия, отмеченная черным цветом — это упрощенный ответ, который показывает изменение напряжения при нагружении тензодатчика элементом.

Данные разделены на две части:

Между А и В, ненагруженный реакция

Между С и D – нагруженная реакция (постоянное состояние ступенчатой функции).

В предлагаемом методе используется выбранный набор данных. Для начала и окончания выборки веса используются два оптических датчика положения. Когда первый датчик блокируется, подается сигнал на сбор данных о весе, а когда блокируется второй датчик, выборка данных о весе заканчивается. Данные, отобранные между сигналами датчиков, используются для оценки веса.

Реакции под нагрузкой и без нагрузки рассматриваются как два набора данных временного ряда. Устойчивое значение каждого из них оценивается отдельно, а разница между двумя устойчивыми значениями может быть использована для оценки массы элемента.

Временной отклик состоит из колебательной динамики, постоянной динамики и шума системы. Для оценки лежащей в основе постоянной динамики используется 1-д фильтр Калмана, и этот подход предполагает, что колебательная динамика и шум являются стохастическим входом для фильтра Калмана.

Модель пространства состояний дискретного времени используется для данных временного ряда, отбираемых через регулярные интервалы времени. Разработка модели пространства состояний объясняется ниже.

Для получения постоянного состояния в качестве модели системы используется постоянная динамическая модель. Дисперсия шума процесса, σ_w была установлена равной нулю, предполагая, что нет несоответствий между моделью и ожидаемым постоянным состоянием [18].

$$x_{t+1} = x_t + w_t; w_t \sim N(0, \sigma_w), \text{ где } \sigma_w = 0.$$

Уравнение измерения одномерной модели пространства состояний было задано уравнением.

$$y_t = x_t + v_t; v_t \sim N(0, \sigma_v).$$

В целом, предлагаемая модель пространства состояний выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t \\ y_t &= x_t + v_t; v_t \sim N(0, \sigma_v), \end{aligned}$$

где σ_v – погрешность измерения, получена из паспорта датчика; x_0 – первое показание данных, отобранных между датчиками положения; P_0 – квадратичная ошибка между первым и вторым показаниями.

Результаты и моделирование. Алгоритм фильтра Калмана протестирован на ряде наборов данных, предоставленных компанией кондитерский комбинат ООО «Азовская кондитерская фабрика». Результаты и моделирование для нагруженных данных приведены в этом разделе. Результаты для незагруженных данных демонстрируют аналогичную производительность.

Характеристики фильтра измеряются путем прямого сравнения времени установления и стандартного отклонения фильтра Калмана с фильтром Баттерворта 5-го порядка [18–22].

Результаты количества тестов были представлены в двух разделах;

- ◆ Постоянная масса при различных скоростях.
- ◆ Меняющиеся массы при постоянной скорости.

Краткие результаты приведены в табл. 1 и табл. 2 ниже.

Таблица 1

Результаты для массы 200г, движущейся со скоростями 0,5м/с, 1,0м/с и 1,5м/с²

Скорость конвейера (м/с)	Баттерворт			Калман		
	Среднее	Стандартное отклонение	Время становления (мс)	Среднее	Стандартное отклонение	Время становления (мс)
0.5	1419.7	34.1	112	2363.0	7.7	28
1.0	1487.1	57.2	67	2458.0	9.0	47
1.5	1703.3	48.5	-	2822.5	15.8	27

Сравнение, приведенное в табл. 1 и табл. 2, показывает, что фильтр Калмана превосходит фильтр низких частот Баттерворта по многим параметрам.

1. Как видно из табл. 1, стандартное отклонение имеет меньшее значение по сравнению с фильтром Баттерворта в каждом случае. Когда 200 г движется со скоростью 0,5 м/с, стандартное отклонение уменьшается с 34,1 до 7,7 (77%), а когда та же масса движется со скоростью 1,5 м/с, стандартное отклонение уменьшается с 48,5 до 15,8 (67,4%).

Таблица 2

Сводка результатов для масс массой 200 г и 573,1 г, движущихся со скоростью 0,5 м/с

Масса (г)	Баттерворт			Калман		
	Среднее	Стандартное отклонение	Время становления (мс)	Среднее	Стандартное отклонение	Время становления (мс)
200.0	1562.8	9.8	112	2130.2	1.7	28
573.1	2323.1	43.9	172	2874.1	9.0	45
573.1	2363.0	36.7	158	2924.9	5.0	30
573.1	2343.9	68.9	-	2891.9	11.1	40
573.1	2286.5	35.9	174	2846.4	4.0	35
573.1	2315.1	52.8	174	2884.8	6.3	35

В таблице (2) показаны результаты испытаний различных масс, движущихся с одинаковой скоростью 0,5 м/с. Эти результаты также демонстрируют аналогичное улучшение стандартного отклонения.

² Примечание: для наглядного представления сигналов в значения сигналов фильтра Баттерворта были внесены некоторые смещения напряжений.

Уменьшение стандартного отклонения уменьшает доверительный интервал на 95%, снижая погрешность отфильтрованного сигнала.

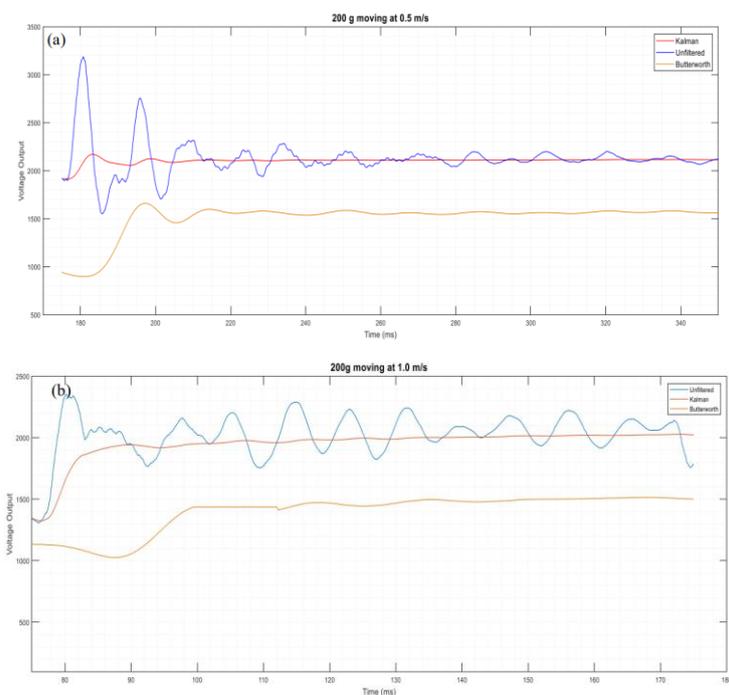
2. Время установления, представленное в табл. 1 и табл. 2 – это время, необходимое для того, чтобы кривая реакции системы достигла и оставалась в пределах 2% от среднего значения. Данные были изучены с помощью электронных таблиц в MS Excel, и для оценки времени установления в каждом случае использовался метод проб и ошибок.

Как видно из таблицы 1, время становления также улучшается при всех скоростях. При скорости 0,5 м/с время становления уменьшается на 75% (112 мс до 28 мс), а при скорости 1,0 м/с время становления уменьшается на 29,8% (с 67 мс до 47 мс). При максимальной скорости, т.е. 1,5 м/с, время становления 27 мс наблюдается при использовании фильтра Калмана, в то время как реакция существующего фильтра Баттерворта не достигает устойчивого состояния до того, как данные будут отобраны для оценки веса.

Это позволяет переходному отклику быстрее достичь устойчивого состояния, что приводит к увеличению «окна усреднения». Это улучшение особенно полезно при более высоких скоростях ленты, когда время сигнала меньше, и сигнал не достигает устойчивого состояния.

Улучшение качества сигнала (стандартное отклонение и время становления), указанное в табл. 1 и 2, показывает, что фильтр Калмана обеспечивает улучшенное решение фильтрации в динамической системе взвешивания, рассматриваемой в данной работе. Уменьшение времени установления и стандартного отклонения приводит к улучшению пропускной способности и точности измерений соответственно.

Некоторые графики, показывающие фильтрованный и нефильтрованный сигнал, приведены на рис. 6.



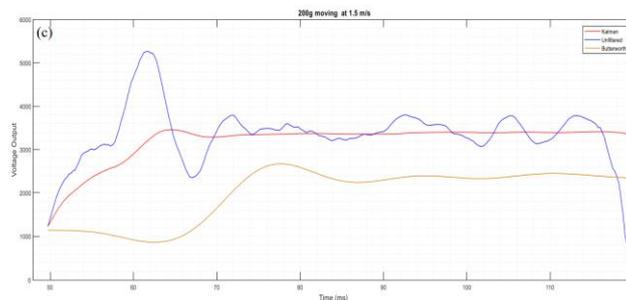


Рис. 6. Графики отфильтрованных и неотфильтрованных данных для «нагруженных данных» для 200-граммового элемента, движущегося со скоростью (a) 0,5 м/с, (b) 1,0 м/с и (c) 1,5 м/с

Выводы. В целом динамические системы взвешивания имеют ограничения в достижении требуемой пропускной способности и точности. В данной части работы рассматривался альтернативный метод, основанный на алгоритме фильтра Калмана. Фильтр Калмана рассматривается как оптимальное решение проблем отслеживания и прогнозирования данных. Фильтр был построен как минимизатор средней ошибки в детерминированном выводе. Фильтр Калмана имеет много преимуществ при оценке состояния в непрерывно изменяющихся системах. Уравнение системы имеет форму разностного уравнения первого порядка, которое использует только информацию о предыдущем состоянии. Следовательно, вычисление состояний происходит быстрее. Коэффициент усиления фильтра обновляется на каждой итерации вычислений, минимизируя остаток с обновленным коэффициентом усиления на каждом шаге.

Фильтр также адаптивен к используемым данным. Все эти характеристики приводят к быстрому отклику, позволяя системе быстро достичь устойчивого состояния.

Непрерывный временной фильтр Калмана ранее использовался для оценки веса в высокоскоростной динамической системе взвешивания с использованием дифференциального уравнения второго порядка в качестве модели системы [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н., Меркулов Р.В. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. – М.: Академия, 2003. – С. 18-19.
2. Маныч А.С., Заргарян Е.В. Контрольно-измерительные средства для взвешивания сыпучих грузов // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Таганрог, 2021. – 493 с.
3. Заргарян Ю.А. Задача управляемости в адаптивной автоматной обучаемой системе управления // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. "Технологии разработки информационных систем", 2020.
4. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V. Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH - 2020 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 2085 (3). – P. 032057(1-7). – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
5. Маныч А.С., Заргарян Е.В. Контрольно-измерительные средства для взвешивания сыпучих грузов // Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении: Матер. всероссийской научно-практической конференции с международным участием / ред. кол.: Светличная Л.А., Чернова Т.В. – Таганрог: ЭльДирект – ИП Шкуркин Д.В. (ДиректСайнс), 2021. – 358 с.

6. *Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A.* Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness // International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919 (2). – P. 022027 (1-8). – DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. *Nagatani T.* The physics of traffic jams // Rep. Prog. Phys. – Sept. 2002. – Vol. 65, No. 9. – P. 1331-1386.
8. *Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A.* Traffic flow prediction using neural network // in 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). – Fez, 2018. – P. 1-4.
9. *Zhang Y. et Liu Y.* Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting. – 2009. – Vol. 3, No. 3. – P. 7.
10. *Сенянский Д.М.* Программная реализация алгоритмов взвешивания вагонов в движении. // Всероссийская молодежная научная конференция VII Королевские чтения: Тезисы доклада. – Самара: СГАУ, 2003.
11. *Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I.* Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data // Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers. – 2016. – P. 128-138.
12. *Иванов В.А., Масленко В.О., Харченко К.А.* Экспериментальное устройство для гидравлического взвешивания груза // Ученые заметки ТОГУ. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 128-137. – Режим доступа: <http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/1505>.
13. *Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьёв В.В.* Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // Информатизация и связь. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
14. *Slimani I., Farissi I. El, et Achhab S.* Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data. – 2015.
15. *Slimani I., Farissi I. El, et Achhab S.* Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data // Int. J. Logist. Syst. Manag. – 2017. – Vol. 28, No. 2. – P. 144-163.
16. *Пушнина И.В.* Система управления подвижным объектом в условиях неопределенности // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. Кисловодский гуманитарно-технический институт, Южный федеральный университет. – Кисловодск, 2018. – С. 65-74.
17. *Wang X., Wang C.* Time series data cleaning: A survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 1866-1881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
18. *Михайлов П.Г.* Микроэлектронный датчик давления и температуры // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 11. – С. 29-31.
19. *Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А.* Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 124-132.
20. *Ольховская Е.С., Палашкин А.А., Кулеш В.В., Номерчук А.Я., Соловьёв В.В.* Разработка модульной системы выращивания растений GROWBOX // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и акустика: Сб. трудов X Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума в рамках мероприятий, посвященных году Науки и технологий в Российской Федерации. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 168-173.
21. *Номерчук А.Я., Крюков В.В., Куканов Р.С.* Аналитическо-экспериментальные исследования функционирования электротехнического комплекса на примере пищевых производств // Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России: Сб. трудов XI Всероссийской Школы-семинара, посвященной 25-летию филиала ЮФУ в г. Геленджике. Составители: Ю.Б. Щемелева, С.В. Кирильчик; Южный федеральный университет. – 2020. – С. 214-218.
22. *Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Sklifus R.V.* Impact Of Road Transport On The Environmental Situation In The Urban Environment // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. Krasnoyarsk, Russia, 2021. – P. 2600-2606.
23. *Бабенко Л.К., Шумилин А.С., Алексеев Д.М.* Алгоритм обеспечения безопасности конфиденциальных данных медицинской информационной системы хранения и обработки результатов обследований // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215). – С. 6-16.

REFERENCES

1. Zaytsev S.A., Gribanov D.D., Tolstov A.N., Merkulov R.V. Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i instrumenty [Control and measuring instruments and instruments]. Moscow: Akademiya, 2003, pp. 18-19.
2. Manych A.S., Zargaryan E.V. Kontrol'no-izmeritel'nye sredstva dlya vzveshivaniya sypuchikh gruzov [Control and measuring means for weighing bulk cargoes], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and applied aspects of computer technologies and information security: materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Taganrog, 2021, 493 p.
3. Zargaryan Yu.A. Zadacha upravlyaemosti v adaptivnoy avtomatnoy obuchaemoy sisteme upravleniya [The problem of controllability in an adaptive automatic trainable control system. In the collection], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem", 2020* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference. "Information Systems Development Technologies", 2020].
4. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V. Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH – 2020, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 2085 (3), pp. 032057(1-7). DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
5. Manych A.S., Zargaryan E.V. Kontrol'no-izmeritel'nye sredstva dlya vzveshivaniya sypuchikh gruzov [Control and measuring means for weighing bulk cargoes], *Issledovanie i proektirovanie intellektual'nykh sistem v avtomobile-stroenii, aviastroenii i mashinostroenii: Mater. vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Research and design of intelligent systems in the automotive, aircraft and mechanical engineering: Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation] ed. col.: Svetlichnaya L.A., Chernova T.V.; Taganrog: El'Direkt – IP Shkurkin D.V. (DirektSayns), 2021, 358 p.
6. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A. Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness, *International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919 (2), pp. 022027 (1-8). DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. Nagatani T. The physics of traffic jams, *Rep. Prog. Phys.*, Sept. 2002, Vol. 65, No. 9, pp. 1331-1386.
8. Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A. Traffic flow prediction using neural network, *2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Fez, 2018, pp. 1-4.
9. Zhang Y. et Liu Y. Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting, 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 7.
10. Senyanskiy D.M. Programmaya realizatsiya algoritmov vzveshivaniya vagonov v dvizhenii [Software implementation of algorithms for weighing wagons in motion], *Vserossiyskaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya VII Korolevskie chteniya: Tezisy doklada* [All-Russian Youth Scientific Conference VII Royal Readings: Abstracts of the report]. Samara: SGAU, 2003.
11. Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I. Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data, *Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers*, 2016, pp. 128-138.
12. Ivanov V.A., Maslenko V.O., Kharchenko K.A. Eksperimental'noe ustroystvo dlya gidravlicheskogo vzveshivaniya gruzha [Experimental device for hydraulic weighing of cargo], *Uchenye zametki TOGU* [Scientific Notes of TOGU], 2017, Vol. 8, No. 1, pp. 128-137. – Available at: <http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/1505>.
13. Finaev V.I., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Solov'ev V.V. Formalizatsiya grupp podvizhnykh ob'ektov v usloviyakh neopredelennosti dlya vybora upravlyayushchikh resheniy [Formalization of groups of moving objects under uncertainty for the choice of control solutions], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2016, No. 3, pp. 56-62.

14. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data, 2015.
15. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data, *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, 2017, Vol. 28, No. 2, pp. 144-163.
16. Pushnina I.V. Sistema upravleniya podvizhnym ob'ektom v usloviyakh neopredelennosti [The control system of a moving object in conditions of uncertainty], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot. Kislovodskiy gumanitarno-tekhnicheskiiy institut, Yuzhnyy federal'nyy universitet* [Science and Education at the turn of the Millennium. collection of research papers. Kislovodsk Humanitarian and Technical Institute, Southern Federal University]. Kislovodsk, 2018, pp. 65-74.
17. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 1866-1881. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
18. Mikhaylov P.G. Mikroelektronnyy datchik davleniya i temperatury [Microelectronic pressure and temperature sensor], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2003, No. 11, pp. 29-31.
19. Alamir Kh.S., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A. Model' prognozirovaniya transportnogo potoka na osnove neyronnykh setey dlya predskazaniya trafika na dorogakh [A traffic flow prediction model based on neural networks for predicting traffic on the roads], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp. 124-132.
20. Ol'khovskaya E.S., Palashkin A.A., Kulesh V.V., Nomerchuk A.Ya., Solov'ev V.V. Razrabotka modul'noy sistemy vyrashchivaniya rasteniy GROWBOX [Development of a modular system for growing plants GROWBOX], *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika: Sb. trudov X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma v ramkakh meropriyatiy, posvyashchennykh godu Nauki i tekhnologiy v Rossiyskoy Federatsii* [Problems of automation. Regional management. Communication and acoustics: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum within the framework of events dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 168-173.
21. Nomerchuk A.Ya., Kryukov V.V., Kukanov R.S. Analiticheskoe-eksperimental'nye issledovaniya funktsionirovaniya elektrotekhnicheskogo kompleksa na primere pishchevykh proizvodstv [Analytical and experimental studies of the functioning of the electrical complex on the example of food production], *Issledovaniya i tvorcheskiiye proekty dlya razvitiya i osvoeniya pribrezhno-shelf'ovykh zon yuga Rossii: Sb. trudov XI Vserossiyskoy Shkoly-seminara, posvyashchennoy 25-letiyu filiala YuFU v g. Gelendzhike. Sostaviteli: Yu.B. Shchemeleva, S.V. Kiril'chik; Yuzhnyy federal'nyy universitet* [Research and creative projects for the development and development of problematic and coastal shelf zones of the South of Russia: Proceedings of the XI All-Russian School-seminar dedicated to the 25th anniversary of the branch of the SFU in Gelendzhik. Compiled by Yu.B. Shchemeleva, S.V. Kirilchik; Southern Federal University], 2020, pp. 214-218.
22. Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Sklifus R.V. Impact Of Road Transport On The Environmental Situation In The Urban Environment, *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. Krasnoyarsk, Russia, 2021*, pp. 2600-2606.
23. Babenko L.K., Shumilin A.S., Alekseev D.M. Algoritm obespecheniya bezopasnosti konfidentsial'nykh dannykh meditsinskoy informatsionnoy sistemy khraneniya i obrabotki rezul'tatov obsledovaniy [Algorithm for ensuring the security of confidential data of the medical information system for storing and processing survey results], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5 (215), pp. 6-16.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Н.А. Иванова.

Заргарян Елена Валерьевна – Южный федеральный университет; e-mail: evzargaryan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Заргарян Юрий Артурович – e-mail: yuzargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfnedu.ru; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Zargaryan Elena Valerevna – Southern Federal University; e-mail: evzargaryan@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zargaryan Yuri Arturovich – e-mail: yazargaryan@sfnedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Nomerchuk Alexander Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfnedu.ru; the department of automatic control systems; senior lecturer.

УДК 004.42

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-249-259

Т.А. Крамаренко, Е.В. Фешина, Т.В. Лукьяненко

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В статье представлены результаты разработки модуля для модернизации мобильного приложения торговой сети. Особенностью представленного модуля мобильного приложения является отображение персонализированных сообщений с рекламой и акциями торговой сети. Для сбора и анализа данных в мобильном приложении применена математическая модель машинного обучения. В деталях описан процесс выбора математической модели, алгоритм работы и этапы обучения модели на тренировочных данных. Проведена оценка качества работы классификатора на тестовой и обучающей выборке. Выполнены классификация объектов тестовой выборки и сравнение реального значения класса с полученным в результате классификации. Авторы в статье представили основные этапы разработки алгоритмы для обработки статистических данных из чеков покупателей. Представлены программные коды реализации модуля анализа чеков и отображения персонализированной рекламы мобильного приложения. Для реализации базы данных в качестве инструментального средства авторами была использована реляционная система управления данными MS SQL Server. Модули мобильного приложения разработаны в среде Android Studio для операционной системы семейства Android. В работе авторы представили основные этапы работы алгоритма и тестирования работоспособности внедренных модулей. На основе данных о совершенных покупателем покупках собираются сведения о предпочитаемых товарах на основе фиксации групп товаров и товарных позиций из чека. К мобильному приложению привязаны карта лояльности торговой сети, а к картам лояльности, в свою очередь, привязаны чеки о покупках. Первоначально в приложении отображалась реклама всех товаров, участвующих в акциях. Актуальной задачей является отображение персонализированной рекламы, которая доказала свою эффективность. Мобильное приложение распространяется бесплатно через Play Market и предназначено для смартфонов под управлением ОС линейки Android. Целью разработки является отображение в приложении на устройстве покупателя сначала рекламы часто покупаемых товаров, а далее остальных акционных товаров. Мобильное приложение прошло нагрузочное тестирование в реальных условиях использования клиентами торговой сети.

Мобильные приложения; информационные системы; Android; алгоритм; машинное обучение; кроссплатформенная разработка.

T.A. Kramarenko, E.V. Feshina, T.V. Lukyanenko

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT MOBILE APPLICATIONS

The article presents the development results of a module for the retail network mobile application modernization. A feature of the presented mobile application module is the display of personalized messages with advertising and promotions of the retail network. A mathematical model of machine learning is used to collect and analyze data in a mobile application. The process of

choosing a mathematical model, the operation algorithm and the model training stages on training data are described in detail. The quality of the classifier's work was evaluated on a test and training sample. Test sample objects classification and the real value of the class comparison with the resulting classification were performed. The authors in the article presented the main stages of the algorithms development for processing statistical data from customer receipts. The program codes for the receipt analysis module implementation and display the mobile application personalized advertising are presented. To implement the database as a tool, the authors used the relational data management system MS SQL Server. The modules of the mobile application are developed in the Android Studio environment for the Android operating system family. The authors presented the algorithm main stages and testing the implemented modules operability in the paper. Based on the data on purchases made by the buyer, information about preferred products is collected based on the fixation of product groups and product items from the receipt. The loyalty card of the retail network is linked to the mobile application, and receipts for purchases are linked to loyalty cards, in turn. Previously, the application displayed ads for all products participating in promotions. The actual task is to display personalized advertising, which has proven its effectiveness. The mobile application is distributed for free through the Play Market and is designed for smartphones running the Android OS line. The purpose of the development is to display in the application on the buyer's device first advertising frequently purchased goods, and then the rest of the promotional goods. The mobile application has passed load testing in real use by customers conditions of the retail network.

Mobile applications, information systems; Android; algorithm; machine learning; development methods; cross-platform development.

Введение. В современном мире предприниматели повышают прибыльность торговых сетей внедрением новых программных решения для учета реализации товаров. Подобные приложения предоставляют огромный спектр инструментов для анализа торговой деятельности. Основными данными при исследовании эффективности работы торговой сети являются ассортимент, цены и объем продаж. Мобильное приложение, взаимодействующее с информационной системой торговой сети позволит увеличить продажи товаров за счет применения персонализированных рекламных объявлений.

Цель исследования. Целью данной работы является разработка прототипа нейронной сети и модуля мобильного приложения, взаимодействующего с базой данных информационной системы торговой сети. В мобильном приложении на основе интеллектуального анализа чеков пользователю будут предлагаться часто покупаемые им товары во время проведения акций.

Результаты исследования. Архитектура приложения в целом была спроектирована и разработана, исходя из требований заказчика в лице администрации торговой сети. В связи с тем, что основной целью создания распределенной базы данных является попытка сделать цепочки поставок более открытыми для поставщиков и клиентов компании, необходимо разработать систему отбора, основанную на смешении нескольких алгоритмов обучения. Это система обработки транзакций, в которой осуществляется определенный список субъектов с установленными идентичностями. Для обмена данными используется алгоритм консенсуса с аутентифицированными участниками. Создатели блока известны и идентифицируются по цифровой подписи блока. Гибрид предполагает объединение свойств одного типа машинного обучения с другим, сделав некоторые данные в распределенной базе данных доступными сначала для клиентов, а только затем для поставщиков компании.

Каждая запись генерирует новый блок, после чего этот блок присоединяется к цепочке уже существующих блоков. Блоком является набор сущностей. Поля Index, Timestamp, Hash, Previous hash и UserToken являются основными для правильной работы распределенной базы данных. Они используются для реализации механизма синхронизации, поиска и проверки правильности цепочки.

Цепочка блоков начинается с первого, так называемого блока «генезис», он отличается от других тем, что поле «Previous hash» имеет нулевое значение, так как это самый первый блок в цепочке и ему не на что ссылаться. Поле данных является типом хранилища ключ-значение и может изменять свой внешний вид в зависимости от типа записи.

В качестве инструментального средства разработки БД использована РСУБД MS SQL Server, а для мобильного приложения среда разработки Android Studio. Мобильное приложение должно быть быстрым, использовать минимальное количество ресурсов гаджета, работать стабильно и выполнять все заложенные в его код функции.

Описание выбранной математической модели машинного обучения.

Логистическая регрессия осуществляет двоичную классификацию, по этой причине маркированные выходы считаются двоичными. Установим $P(y = 1 | x)$ как условную возможность того, что выход y равен 1 при условии, что установлен входной параметр вектор-функции x . Коэффициенты w – это веса, которые модель стремится изучить.

$$P(y = 1|x) = \frac{1}{1+e^{-w^T x}}. \quad (1)$$

Так как данный метод вычисляет возможность принадлежности к любому классу, следует принимать во внимание, в какой степени вероятность отличается от 0 или 1 а также усредняет его согласно абсолютно всем объектам, как это делается в линейной регрессии. Подобная функция потерь предполагает собой среднее значение кросс-энтропии.

$$L(w) = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [y_n \log(\text{ypred}_n) + (1 - y_n) \log(1 - \text{ypred}_n)]. \quad (2)$$

Если y равно 0, то первое слагаемое при сумме равно 0, а второе меньше, чем мы предсказали y_{pred} до 0 согласно свойствам логарифма. Аналогично, в случае, когда y равно 1. Если оценивать качество на той же выборке, на которой алгоритм обучался, оценка будет не соответствовать реальному качеству алгоритма и слишком оптимистичной.

Он принимает линейную комбинацию функций и применяет к ней нелинейную функцию, поэтому это очень малая часть нейронной сети. Алгоритм переобучается и начинает выдавать верные результаты из своей выборки. Алгоритм может находить закономерности в шуме, который всегда есть в данных, а шум на другой выборке примет иные значения, таким образом предсказание алгоритма будет неверным. Он может запомнить или выучить выборку, тогда новые примеры он может совсем не понять. Методом борьбы с данной проблемой является использование отдельных наборов данных для оценки и обучения.

Основные этапы работы алгоритма:

1. Скрытые данные (Hold-out validation): train/validation/test датасеты; обучение модели на train данных; выбор модели по validation; проверка на test данных.
2. Кросс-валидация (k-fold cross-validation): разделение данные на k элементов; обучение на $(k-1)$ элементе; усреднение результата.
3. Bootstrap resampling: генерация нового объема данных; производится выборка из исходных данных.

Одна модель редко используется, обычно требуется попробовать различные варианты модели различных классов или одной модели. Для выбора лучшей и оценки качества модели используется валидационная выборка (validation set), на которой модель не обучалась. В результате работы оценивается модель на тестовой выборке (test set), это нужно для получения не слишком оптимистичной оценки качества модели.

Модель обучается на тренировочных данных (train set). Обучение может означать изменение структуры модели или приспособливание каких-то численных параметров модели. В итоге получаются параметры модели, которые позволяют эффективно выполнять свои функции.

Чаще всего в рекомендательных системах используется алгоритм синхронизированной фильтрации. В качестве меры сходства можно начать с косинусной меры:

$$\text{sim}(x, y) = \cos(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\vec{x} \cdot \vec{y}}{\|\vec{x}\|_2 \times \|\vec{y}\|_2} = \frac{\sum_{i \in I_{xy}} r_{x,i} r_{y,i}}{\sqrt{\sum_{i \in I_{xy}} r_{x,i}^2} \sqrt{\sum_{i \in I_{xy}} r_{y,i}^2}}. \quad (3)$$

В данном случае k -ближайших соседей – это простой способ отфильтровать k пользователей с наиболее похожими вкусами, чтобы применять алгоритм синхронизированной фильтрации только к ним. Если производительность системы не позволяет для каждой из рекомендаций рассчитывать меру сходства со всеми пользователями, то в данном случае может быть использовано предварительное распределение пользователей.

В итоге, алгоритм может выглядеть следующим образом:

1. Регулярно производится распределение пользователей (раз в день / N дней).
2. Производится вычисление косинусной меры сходства только с пользователями, находящимися в том же кластере, что и рассматриваемый.
3. Из получившегося числа сходств выбирается k лучших, для которых применяется синхронизированная фильтрация.

При такой реализации нужно обратить внимание на количество кластеров и размер k – эти параметры отвечают за баланс между точностью и скоростью работы рекомендации.

Кроме того, можно хранить предрасчитанные типичные рекомендации при появлении новых пользователей, а для пользователей, которые уже имеют покупки, но не участвовали в кластеризации, можно рассчитать сначала меру сходства с центроидами, полученными в ходе работы метода k -means, таким образом определив их кластер.

Для обучения классификатора необходимо иметь обучающий набор товаров, для которых вручную заранее определены группы, с привлечением специалистов в исследуемой области. Чтобы классифицировать каждый объект тестовой выборки необходимо последовательно выполнить следующие операции:

1. Вычислить расстояние до каждого из объектов обучающей выборки.
2. Отобрать k объектов обучающей выборки, расстояние до которых минимально.

Класс классифицируемого объекта – это класс, наиболее часто встречающийся среди k ближайших соседей. Примеры, приведенные ниже, реализованы на Python. Для корректного их исполнения помимо Python должны быть установлены NumPy, PyLab и Matplotlib. Рассмотрим работу классификатора на примере.

Для вывода результата использован следующий код:

```
def shDataOnMesh (nClasses, nItemsClass, k):
    def generateTestMesh (tData):
        y_min = min( [tData[i][0][1] for i in range(len(tData))] ) - 1.0
        y_max = max( [tData[i][0][1] for i in range(len(tData))] ) + 1.0
        x_min = min( [tData[i][0][0] for i in range(len(tData))] ) - 1.0
        x_max = max( [tData[i][0][0] for i in range(len(tData))] ) + 1.0
        h = 0.05
        teX, teY = np.meshgrid(np.arange(x_min, x_max, h),
                               np.arange(y_min, y_max, h))
```

```

    return [teX, teY]
    testData = generateData (nItemsClass, nClasses)
    teMesh = generateTestMesh (trData)
    teMeshLabels = classKNN (tData, zip(teMesh[0].ravel(),
teMesh[1].ravel()), k, nClasses)
    classColormap = ListedColormap(['#FF0000', '#00FF00', '#FFFFFF'])
    teColormap = ListedColormap(['#FFAAAA', '#AAFFAA', '#AAAAAA'])
    pb.pcolormesh(teMesh[0],
teMesh[1],
np.asarray(teMeshLabels).reshape(teMesh[0].shape),
cmap=teColormap)
    pb.scatter([tData[i][0][0] for i in range(len(tData))],
[tData[i][0][1] for i in range(len(tData))],
c=[tData[i][1] for i in range(len(tData))],
cmap=classColormap)
    pb.show()

```

Необходимо сгенерировать данные, на которых будут производиться эксперименты:

```

def generateData (nClassEl, nOfClasses):
    data = []
    for cNum in range(nOfClasses):
        centerY, centerX = random.random()*5.0, random.random()*5.0
        for rNum in range(nOfClassEl):
            random.gauss(centerY,0.5)], classNum)],
    data.append([[random.gauss(centerX,0.5),
return data

```

Для простоты было выбрано двумерное пространство, в котором случайным образом на участке от 0 до 5 по каждой из осей выбирается местоположение математического ожидания двумерного Гауссиана со среднеквадратичным отклонением 0,5. Значение 0,5 выбрано, чтобы объекты оказались достаточно хорошо разделимыми (правило трех сигм).

Чтобы посмотреть на полученную выборку, нужно выполнить следующий код:

```

def sData (nClasses, nItemsClass):
    tData = generateData (nItemsClass, nClasses)
    class Colormap = ListedColormap(['#FF0000', '#00FF00', '#FFFFFF'])
    pb.scatter([tData[i][0][0] for i in range(len(trainData))],
[tData[i][0][1] for i in range(len(trainData))],
[tData[i][1] for i in range(len(trainData))],
nmap=classColormap)
    pb.show()
showData (3, 40)

```

Результат выполнения кода изображен на рисунке 1 (слева). Далее необходимо разбить это множество на две части: тестовая выборка и обучающая выборка.

Для этого предназначен следующий код:

```

def splitTTest (data, tPercent):
    tData = []
    teData = []
    for row in data:

```

```

    if random.random() < tPercent:
        testData.append(row)
    else:
        trainData.append(row)
return trainData, testData

```

Далее, имея обучающую выборку, можно реализовать алгоритм классификации:

```

def classKNN (trainData, testData, k, nOfClasses):
def dist (a, b):
return math.sqrt((a[0] - b[0])**2 + (a[1] - b[1])**2)
testLabels = []
for testPoint in testData:
    testDist = [ dist(testPoint, trainData[i][0]), trainData[i][1] for i in
range(len(trainData))]
    res = [0 for i in range(nOfClasses)]
    for d in sorted(testDist)[0:k]:
        res[d[1]] += 1
    testLabels.append( sorted(zip(res, range(nOfClasses)), reverse=True)[0][1] )
return testLabels

```

Теперь можно оценить, насколько хорошо работает классификатор. Для этого сгенерируем данные, разобьем их на тестовую и обучающую выборку, произведем классификацию объектов тестовой выборки и сравним реальное значение класса с полученным в результате классификации.

```

def calcAccuracy (nClasses, nItemsInClass, k, testPercent):
data = generateData (nItemsInClass, nClasses)
trainData, testLabels = splitTestTrain (data, testPercent)
testData = [testDataLabels[i][0] for i in range(len(testDataWithLabels))]
testLabels = classKNN (trainData, testData, k, nClasses)
print "Accuracy: ", sum([int(testLabels[i]==testDataLabels[i][1])
for i in range(len(testDataLabels))]) / float(len(testDataLabels))

```

На рис. 1 (слева) использовалось 3 класса, в каждом по 40 элементов, значение k для алгоритма равно 3.

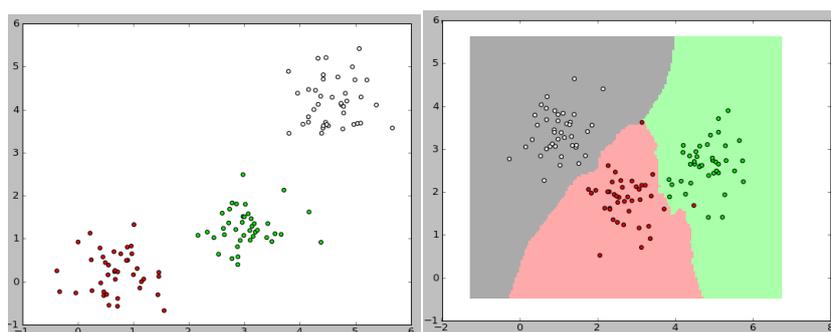


Рис. 1. Результаты генерации данных (слева) и обучения нейронной сети (справа)

Практическая значимость. При первом запуске приложения, необходимо привязать карту лояльности торговой сети. На вкладке «Карта» будет отображен QR код, который необходимо предоставить сотруднику магазина при покупке то-

варов, а на вкладке «Акции» будут отображены персональные рекомендации к покупке товаров. Мобильное приложение распространяется бесплатно, но его внедрение принесет прибыль за счет использования персонализированной рекламы и акционных товаров.

Заключение. Разработанный интеллектуальный модуль для мобильного приложения торговой сети внедрен и успешно эксплуатируется. Ранее в мобильном приложении были реализованы такие функции как, предоставление каталога товаров, поиск товара по артикулу, названию, штрих-код и номер карты лояльности, личные данные владельца карты. Каждый покупатель мог проверить на какую сумму он приобрел товары в течении прошлого и текущего месяца, выяснить какой процент от суммы покупок возвращается на карту лояльности в виде баллов, которые он может потратить.

Все пользователи видели в приложении одинаковый набор рекламных объявлений товаров и информацию о проводимых акциях. Эффективность такой рекламы была низкой, т.к. не учитывала реальные интересы покупателя, а иногда вызвала негативную реакцию. Мобильное приложение, разработка которого описана в представленной работе, успешно используется клиентами торговой сети. Рекламные блоки должны отображаться в порядке предпочтений покупателя, но не ограничиваться ими. Ранее в мобильном приложении для анализа чеков и предпочтений покупателей не использовались методы искусственного интеллекта, выполнялись стандартные расчеты с применением статистических методов.

Экспериментально доказана эффективность применения персонализированной рекламы на основе интеллектуального анализа покупательских чеков, что подтверждается увеличением объема продаж и скорости оборота во время проведения акций по определенным видам товаров.

После выхода обновленного мобильного приложения и его распространения среди покупателей, было проведено исследование, результаты которого подтвердили связь просмотра персонализированной рекламы и появления товаров в новых чеках покупателей. В следующих публикациях авторами будут представлены материалы по упомянутому исследованию. Можно утверждать, что в настоящее время актуальным является применение в разработке мобильных приложений элементов искусственного интеллекта для обработки данных и адаптации функционала под конкретного пользователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Танкаян А.И., Лукьяненко Т.В., Крамаренко Т.А.* Информационный маркетинг в интернете как средство дополнительного канала продвижения // Экономика устойчивого развития. – 2018. – № 2 (34). – С. 338-343.
2. *Лукьяненко Т.В., Овчаров А.П., Лабинцева В.Р.* Особенности использования ORM-средства Entity Framework для разработки программных приложений, ориентированных на данные // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: Сб. материалов III всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар: КубГАУ, 2021. – С. 322-325.
3. *Лукьяненко Т.В., Гермоний Э.В., Лойко В.И.* Формирование портрета клиента на основе статистических данных // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: Сб. материалов II всероссийской студенческой научно-практической конференции. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – С. 34-35.
4. *Лукьяненко Т.В., Лабинцева В.Р., Овчаров А.П.* Роль тестирования в разработке программного обеспечения // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: Сб. материалов I всероссийской студенческой научно-практической конференции. – Краснодар: КубГАУ, 2019. – С. 398-401.
5. *Иванова Е.А., Крамаренко Т.А.* Кроссплатформенные приложения: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – 165 с.

6. *Копань А.О., Крамаренко Т.А.* Сравнительная характеристика нативных, веб и гибридных мобильных приложений // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития: Сб. материалов XI студенческого Международного форума. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 159-161.
7. *Омельченко Д.А., Меньшиков В.Е., Фешина Е.В.* Тенденции разработки мобильных приложений // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития: Сб. материалов XII международного студенческого форума. – Краснодар: КубГАУ, 2019. – С. 350-352.
8. *Филоненко М.В., Крамаренко Т.А.* Особенности использования среды Eclipse IDE для разработки мобильных приложений // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития: Сб. материалов XI студенческого Международного форума. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 351-354.
9. *Зубко А.А., Крамаренко Т.А.* Разработка кроссплатформенных приложений на фреймворке QT // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития: Сб. материалов XI студенческого Международного форума. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 328-330.
10. *Груммет В.А., Лисовин О.А., Фешина Е.В., Куштанок С.А.* Способы защиты мобильного приложения под Android // Наука XXI века: проблемы, перспективы и актуальные вопросы развития общества, науки и образования: Матер. международной межвузовской осенней научно-практической конференции (пгт Яблоновский, 25 сентября 2020 года). – Краснодар: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2020. – С. 53-57.
11. *Фешина Е.В., Лукьяненко Т.В.* Применение технологии нейронных сетей и БИК-спектроскопии для определения количества вещества в производимой предприятием продукции: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2021. – 174 с.
12. *Лукьяненко Т.В., Широкова А.А.* К вопросу о совместном использовании технологий облачных вычислений и больших данных // Интеллектуальные информационные системы: Тр. Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Воронеж: ВТГУ, 2018. – С. 155-157.
13. *Мотылец А.А., Фешина Е.В.* Методы реализации веб-сайта в виде мобильного приложения // Наука XXI века: проблемы, перспективы и актуальные вопросы развития общества: Матер. международной межвузовской осенней научно-практической конференции, (пгт Яблоновский, 25 сентября 2020 года). – Краснодар: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2020. – 333 с.
14. *Филипенко С.С., Лукьяненко Т.В.* Выбор эффективного способа внедрения Web-сайта в информационное мобильное пространство // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по материалам 73-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2017 год. Отв. за вып. А.Г. Кошаев. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 604-607.
15. *Лукьяненко Т.В., Копань А.О.* Многослойные и многоуровневые системы хранения данных // Интеллектуальные информационные системы: Тр. Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Воронеж: ВТГУ, 2018. – С. 75-78.
16. *Лукьяненко Т.В., Острицова В.А.* Оптимизация индексов или как повысить скорость выполнения запросов в условиях ограниченности ресурсов // Интеллектуальные информационные системы: Тр. Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Воронеж: ВТГУ, 2018. – С. 108-112.
17. *Лукьяненко Т.В., Соломко Д.С.* Тенденции в использовании различных СУБД при разработке машинного обучения // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по материалам 76-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2020 год. В 3-х ч. Отв. за вып. А.Г. Кошаев. – Краснодар: КубГАУ, 2021. – С. 763-766.
18. *Крамаренко Т.А., Лукьяненко Т.В.* Методики и модели проектирования и разработки информационных систем: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 175 с.
19. *Зуев А.В., Крамаренко Т.А.* К вопросу выбора интегрированной среды разработки веб-приложений // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по материалам XI Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Отв. за вып. А.Г. Кошаев. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 239-240.
20. *Щербин М.М., Ворожейкин Д.С., Крамаренко Т.А.* Обзор этапов жизненного цикла мобильного приложения // Интеллектуальные информационные системы: Тр. Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Воронеж: ВТГУ, 2018. – С. 180-183.

REFERENCES

1. *Tankayan A.I., Luk'yanenko T.V., Kramarenko T.A.* Informatsionnyy marketing v internete kak sredstvo dopolnitel'nogo kanala prodvizheniya [Information marketing on the Internet as a means of an additional promotion channel], *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development], 2018, No. 2 (34), pp. 338-343.
2. *Luk'yanenko T.V., Ovcharov A.P., Labintseva V.R.* Osobennosti ispol'zovaniya ORM-sredstva Entity Framework dlya razrabotki programmykh prilozheniy, orientirovannykh na dannye [Features of using the Entity Framework ORM tool for developing data-oriented software applications], *Tsifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty: Sb. materialov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digitalization of the economy: directions, methods, tools: Collection of materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnodar: KubGAU, 2021, pp. 322-325.
3. *Luk'yanenko T.V., Germoniy E.V., Loyko V.I.* Formirovanie portreta klienta na osnove statisticheskikh dannykh [Formation of a client's portrait based on statistical data], *Tsifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty: Sb. materialov II vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digitalization of the economy: directions, methods, tools: Collection of materials of the II All-Russian Student Scientific and Practical Conference]. Krasnodar: KubGAU, 2020, pp. 34-35.
4. *Luk'yanenko T.V., Labintseva V.R., Ovcharov A.P.* Rol' testirovaniya v razrabotke programmogo obespecheniya [The role of testing in software development], *Tsifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty: Sb. materialov II vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digitalization of the economy: directions, methods, tools: Collection of materials of the II All-Russian Student Scientific and Practical Conference]. Krasnodar: KubGAU, 2019, pp. 398-401.
5. *Ivanova E.A., Kramarenko T.A.* Krossplatformennyye prilozheniya: ucheb. posobie [Cross-platform applications: textbook]. Krasnodar: KubGAU, 2020, 165 p.
6. *Kopan' A.O., Kramarenko T.A.* Sravnitel'naya kharakteristika nativnykh, veb i gibridnykh mobil'nykh prilozheniy [Comparative characteristics of native, web and hybrid mobile applications], *Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: Sb. materialov XI studencheskogo Mezhdunarodnogo foruma* [Information society: current state and development prospects: Collection of materials of the XI Student International Forum]. Krasnodar: KubGAU, 2018, pp. 159-161.
7. *Omel'chenko D.A., Men'shikov V.E., Feshina E.V.* Tendentsii razrabotki mobil'nykh prilozheniy [Mobile application development trends], *Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: Sb. materialov XII mezhdunarodnogo studencheskogo foruma* [Information society: current state and development prospects: Collection of materials of the XII International Student Forum]. Krasnodar: KubGAU, 2019, pp. 350-352.
8. *Filonenko M.V., Kramarenko T.A.* Osobennosti ispol'zovaniya sredey Eclipse IDE dlya razrabotki mobil'nykh prilozheniy [Features of using the Eclipse IDE for developing mobile applications], *Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: Sb. materialov XI studencheskogo Mezhdunarodnogo foruma* [Information society: current state and development prospects: Collection of materials of the XI Student International Forum]. Krasnodar: KubGAU, 2018, pp. 351-354.
9. *Zubko A.A., Kramarenko T.A.* Razrabotka krossplatformennykh prilozheniy na freymvroke QT [Development of cross-platform applications on the QT framework], *Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: Sb. materialov XI studencheskogo Mezhdunarodnogo foruma* [Information society: current state and development prospects: Collection of materials of the XI Student International Forum]. Krasnodar: KubGAU, 2018, pp. 328-330.
10. *Grummet V.A., Lisovin O.A., Feshina E.V., Kushtanok S.A.* Sposoby zashchity mobil'nogo prilozheniya pod Android [Ways to protect a mobile application for Android], *Nauka XXI veka: problemy, perspektivy i aktual'nye voprosy razvitiya obshchestva, nauki i obrazovaniya: Mater. mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy osenney nauchno-prakticheskoy konferentsii (pgt Yablonovskiy, 25 sentyabrya 2020 goda)* [Science of the XXI century: problems, prospects and topical issues of the development of society, science and education. Materials of the international interuniversity autumn scientific and practical conference (Yablonovsky township, September 25, 2020)]. Krasnodar: Krasnodarskiy TSNTI – filial FGBU «REA» Minenergo Rossii, 2020, pp. 53-57.

11. *Feshina E.V., Luk'yanenko T.V.* Primenenie tekhnologii neyronnykh setey i BIK-spektroskopii dlya opredeleniya kolichestva veshchestva v proizvodimoy predpriyatiem produktsii: monografiya [Application of technology of neural networks and NIR spectroscopy to determine the amount of a substance in the products manufactured by an enterprise: monograph]. Krasnodar: KubGAU, 2021, 174 p.
12. *Luk'yanenko T.V., SHirokova A.A.* K voprosu o sovместnom ispol'zovanii tekhnologiy oblachnykh vychisleniy i bol'shikh dannykh [On the question of the joint use of cloud computing technologies and big data], *Intellektual'nye informatsionnye sistemy: Tr. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent Information systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. In 2 part. Voronezh: VTGU, 2018, pp. 155-157.
13. *Motylets A.A., Feshina E.V.* Metody realizatsii veb-sayta v vide mobil'nogo prilozheniya [Implementing methods of a website in the mobile application form], *Nauka XXI veka: problemy, perspektivy i aktual'nye voprosy razvitiya obshchestva: Mater. mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy osenney nauchno-prakticheskoy konferentsii (pgt Yablonovskiy, 25 sentyabrya 2020 goda)* [Science of the XXI century: problems, prospects and topical issues of the society development: Materials international. interuniversity autumn scientific and practical conference, (Yablonovsky township, September 25, 2020)]. Krasnodar: Krasnodarskiy TSNTI – filial FGBU «REA» Minenergo Rossii, 2020, 333 p.
14. *Filipenko S.S., Luk'yanenko T.V.* Vybor effektivnogo sposoba vnedreniya Web-sayta v informatsionnoe mobil'noe prostranstvo [Choosing an effective way to introduce a Web site into the information mobile space], *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sb. statey po materialam 73-y nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov po itogam NIR za 2017 god* [Scientific support of the agro-industrial complex: Collection of articles based on the materials of the 73rd scientific and practical conference of students based on the results of research for 2017]. Rel. for the issue of A.G. Koshchaev. Krasnodar: KubGAU, 2018, pp. 604-607.
15. *Luk'yanenko T.V., Kopan' A.O.* Mnogosloynnye i mnogourovnevnye sistemy khraneniya dannykh [Multilayer and multilevel data storage systems], *Intellektual'nye informatsionnye sistemy: Tr. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent information systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. In 2 part. Voronezh: VTGU, 2018, pp. 75-78.
16. *Luk'yanenko T.V., Ostritsova V.A.* Optimizatsiya indeksov ili kak povysit' skorost' vypolneniya zaprosov v usloviyakh ogranichenosti resursov [Index optimization or how to increase the speed of query execution in conditions of limited resources], *Intellektual'nye informatsionnye sistemy: Tr. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent Information systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. In 2 part. Voronezh: VTGU, 2018, pp. 108-112.
17. *Luk'yanenko T.V., Solomko D.S.* Tendentsii v ispol'zovanii razlichnykh SUBD pri razrabotke mashinnogo obucheniya [Trends in the use of various DBMS in the development of machine learning], *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sb. statey po materialam 76-y nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov po itogam NIR za 2020 god* [Scientific support of the agro-industrial complex: Collection of articles based on the materials of the 76th scientific and practical conference of students based on the results of research for 2020]. In 3 part. Ed. for the issue of A.G. Koshchaev. Krasnodar: KubGAU, 2021, pp. 763-766.
18. *Kramarenko T.A., Luk'yanenko T.V.* Metodiki i modeli proektirovaniya i razrabotki informatsionnykh sistem: monografiya [Methods and models of design and development of information systems: monograph]. Krasnodar: KubGAU, 2018, 175 p.
19. *Zuev A.V., Kramarenko T.A.* K voprosu vybora integrirovannoy sredy razrabotki veb-prilozheniy [To the question of choosing an integrated development environment for a web application], *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sb. statey po materialam KhI Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 95-letiyu Kubanskogo GAU i 80-letiyu so dnya obrazovaniya Krasnodarskogo kraya* [Scientific support of the agro-industrial complex: collection of articles based on the materials of the XI All-Russian Conference of Young Scientists, dedicated to the 95th anniversary of the Kuban State Agrarian University and the 80th anniversary of the formation of the Krasnodar Territory]. Ed. for the issue A.G. Koshchaev. Krasnodar: KubGAU, 2017, pp. 239-240.

20. *Shcherbin M.M., Vorozheykin D.S., Kramarenko T.A. Obzor etapov zhiznennogo tsikla mobil'nogo prilozheniya [An overview of the stages of the mobile application life cycle], Intellektual'nye informatsionnye sistemy: Tr. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Intelligent information systems: coll. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. In 2 part. Voronezh: VGTU, 2018, pp. 180-183.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.А. Аршинов.

Крамаренко Татьяна Анатольевна – Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина; e-mail: t_kramarenko@mail.ru; г. Краснодар, Россия; канд. пед. наук.

Фешина Елена Васильевна – e-mail: fev59@mail.ru; канд. пед. наук.

Лукьяненко Татьяна Викторовна – e-mail: tanyaluk0103@gmail.com; к.т.н.; доцент ВАК.

Kramarenko Tatyana Anatolyevna – Kuban State Agrarian University I.T. Trubilina; e-mail: t_kramarenko@mail.ru; Krasnodar, Russia; cand. of ped. sc.

Feshina Elena Vasilievna – e-mail: fev59@mail.ru; cand. of ped. sc.

Lukyanenko Tatyana Viktorovna – e-mail: tanyaluk0103@gmail.com; cand. of eng. sc.; assistant 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/>.