



№3-2022

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Вычислительные и информационно-управляющие системы
- Алгоритмы обработки информации
- Моделирование процессов и систем
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

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

Научно-технический и прикладной журнал

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

Подписной индекс 41970

№ 3 (227). 2022 г.

Тематический выпуск

КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ИНЖЕНЕРИИ И УПРАВЛЕНИИ

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

Редакционный совет

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.

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 09.08.2022 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,3. Уч.-изд. л. – 21,7.

Заказ № 8599. 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. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Мохаммад Джалаль Алмашаал К ОЦЕНКЕ ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	6
С.Л. Беляков, А.В. Боженюк, Н.А. Голова, И.Н. Розенберг, К.С. Яворчук ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА	14
С.С. Датвасе, Р.Р. Дешмукх, Р.С. Гупта СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТУПНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОТПЕЧАТКОВ ЛАДОНИ: ОБЗОР	27
А.О. Касьянов ПРИМЕНЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА	38
В.В. Лисяк ОБЗОР СЛАЙСЕРОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ	60
А.В. Мангушев РЕАЛИЗАЦИЯ MQTT КЛИЕНТА НА БАЗЕ ОДНОКРИСТАЛЬНОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ЗАДАЧ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ	75
Н.К. Полуянович, Н.В. Азаров, М.Н. Дубяго НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ	84
Ю.А. Заргарян, В.И. Кошенский, К.О. Кирсанов, М.С. Пресняков ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH LOW ENERGY ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛЮДЕЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ	103

РАЗДЕЛ II. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

М.С. Анферова, А.М. Белевцев АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ МОНИТОРИНГА	119
С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КВАНТОВОГО КОДА ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК	129
В.И. Данильченко, В.М. Курейчик ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТРИБУТИВНОЙ СЕМАНТИКИ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗНАЧИМЫХ СОЧЕТАНИЙ ЗАГОЛОВКОВ НЕСКОЛЬКИХ КОЛЛЕКЦИЙ ТЕКСТОВ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ	139
Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев, А.Э. Саак ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬЦЕВОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ РЕСУРСОВ В ГРИД-СИСТЕМАХ	147
Н.А. Будко, А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев ВЫЧИТАНИЕ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В МУТНОЙ ВОДЕ	158
В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Д.О. Бросалин, М.А. Васильева, Б.В. Гуренко, Н. Хамдан ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ДВУМЕРНЫХ КАРТОГРАФИРОВАННЫХ СРЕДАХ	170

И.О. Шепель ОБНАРУЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА КАРТЕ ЗАНЯТОСТИ С НАКОПЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ	192
Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер, И.И. Турулин МЕТОДИКА УМЕНЬШЕНИЯ ВЫБРОСА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ЦИФРОВОМ ФИЛЬТРЕ НИЖНИХ ЧАСТОТ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ СРЕЗА	202

РАЗДЕЛ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Р.М. Ауси, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ	211
С.И. Клевцов ВЫБОР МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЬЮ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	222
Г.В. Куповых, А.Г. Клово, В.В. Гривцов, О.В. Белоусова МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НЕТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ	234
А.М. Пилипенко, А.В. Агабекян МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В SPICE-СИМУЛЯТОРАХ	243
А. Аль-Шамки, В.В. Шадрина, В.Г. Галалу МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ	254

РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

А.В. Андрианов, Д.Е. Губарев, А.Н. Зикий, П.Н. Зламан ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА.....	263
С.А. Паньчев, А.И. Паньчев, А.В. Максимов РЕАЛИЗАЦИЯ В БАЗИСЕ ПЛИС РЕЛЯТОРНЫХ КОНТРОЛИРУЮЩИХ ОПРОСНЫХ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ	270
А.В. Хлуднев ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И СОПТ	280
Т.Г. Цой ОЦЕНКА СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОЙ КАМЕРЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА «СЕРВОСИЛА ИНЖЕНЕР» В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ	289

CONTENT

SECTION I. COMPUTING AND INFORMATION CONTROL SYSTEMS

Mohammad Jalal Almashaal TO ESTIMATION OF ATTRACTION AREA OF EQUILIBRIUM IN NONLINEAR CONTROL SYSTEMS	6
S.L. Belyakov, A.V. Bozhenyuk, N.A. Golova, I.N. Rosenberg, K.S. Yavorchuk INTELLIGENT RECOMMENDER SYSTEM FOR SPATIAL ANALYSIS	14
S.S. Datwase, R.R. Deshmukh, R.S. Gupta MODERN AVAILABLE PALMPRINT DATABASES: A REVIEW	27
A.O. Kasyanov PRINTED LATTICES APPLICATION TO ELECTROMAGNETIC WAVES POLARIZATION CONTROL AT MICROWAVES	38
V.V. Lisyak OVERVIEW OF 3D PRINTING SLICERS	61
A.V. Mangushev MQTT CLIENT IMPLEMENTATION BASED ON A SINGLE-CHIP MICROCONTROLLER FOR REMOTE EQUIPMENT MANAGEMENT TASKS.....	75
N.K. Poluyanovich, N.V. Azarov, M.N. Dubyago NEUROCOMPUTER CONTROL OF CABLE NETWORKS BANDWIDTH THROUGH ACCOUNTING AND CONTROL OF THEIR PARAMETERS	85
Yu.A. Zargaryan, V.I. Koshensky, K.O. Kirsanov, M.S. Presnyakov APPLICATION OF BLUETOOTH LOW ENERGY TECHNOLOGY TO CONTROL THE MOVEMENT OF PEOPLE INDOOR	104

SECTION II. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

M.S. Anferova, A.M. Belevtsev ANALYSIS OF REQUIREMENTS AND DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR INTELLIGENT MONITORING SERVICES	119
S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A QUANTUM CODE FOR ERROR CORRECTION	130
V.I. Danilchenko, V.M. Kureichik THE USE OF DISTRIBUTIVE SEMANTICS IN THE IDENTIFICATION OF SIGNIFICANT COMBINATIONS OF TITLES OF SEVERAL TEXT COLLECTIONS IN THE FORMALIZATION OF LINGUISTIC EXPERT INFORMATION	140
D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev, A.E. Saak CENTRAL-RING POLYNOMIAL ALGORITHM FOR DISTRIBUTION OF COMPUTATION-TIME RESOURCES IN GRID SYSTEMS	148
N.A. Budko, A.Yu. Budko, M.Yu. Medvedev SUBTRACTION OF BACKPROPAGATION INTERFERENCE BASED ON POLARIZATION IN UNDERWATER VISION SYSTEMS FOR OPERATION IN TURBID WATER	159
V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, D.O. Brosalin, M.A. Vasileva, B.V. Gurenko, N. Hamdan STUDY OF PATH PLANNING METHODS IN TWO-DIMENSIONAL MAPPED ENVIRONMENTS	171
I.O. Shepel PARTICLE FILTER BASED DETECTION OF DYNAMIC OBJECTS ON AN ACCUMULATED OCCUPANCY MAP	193
Al-Karawi Hussein Shakor Mogheer, I.I. Turulin REDUCTION APPROACH OF TRANSIENT PROCESS OVERSHOOT IN CONTROLLED TUNABLE LOW PASS DIGITAL FILTER	202

SECTION III. SIMULATION OF PROCESSES AND SYSTEMS

R.M. Ausi, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING MODELS FOR ELECTRONIC INFORMATION SECURITY IN MOBILE NETWORKS	211
S.I. Klevtsov SELECTION OF THE SENSOR CONVERSION CHARACTERISTIC MODEL FOR CONTROLLING THE ERROR IN THE MEASUREMENT OF PHYSICAL QUANTITIES	223
G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, V.V. Grivtsov, O.V. Belousova MODELING OF THE NON-TURBULENT SURFACE LAYER ELECTRODYNAMIC STRUCTURE.....	235
A.M. Pilipenko, A.V. Agabekyan MODEL OF SELF-OSCILLATING CIRCUIT FOR TESTING NUMERICAL METHODS OF TRANSIENT ANALYSIS IN SPICE-SIMULATORS	244
A. Al-Shamki, V.V. Shadrina, V.G. Galalu SIMULATION OF A HYBRID CONTROLLER FOR CONTROLLING PLASMA WELDING PARAMETERS.....	266

SECTION IV. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGIES AND INSTRUMENTATION

A.V. Andrianov, D.E. Gubarev, A.N. Zikiy, P.N. Zlaman EXPERIMENTAL STUDY OF A PROTECTIVE DEVICE	263
S.A. Panychev, A.I. Panychev, A.V. Maksimov IMPLEMENTATION OF RELATIONAL DEVICES OF DIGITAL SIGNALS MONITORING AND POLLING IN THE FPGA BASIS	270
A.V. Khludenev PARAMETRIC MATCHING OF INSULATION MONITORING DEVICES AND DC DISTRIBUTION SYSTEMS.....	280
T.G. Tsoy FIDUCIAL MARKERS EVALUATION USING ONBOARD CAMERA OF SERVOSILA ENGINEER MOBILE ROBOT IN INDOOR SETTINGS	290

Раздел I. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 21474

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-6-14

Мохаммад Джалаль Алмашаал

К ОЦЕНКЕ ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Синтез нелинейных систем управления, по-прежнему, является сложной задачей, поэтому многие исследователи пытаются найти эффективные способы и методы решения этой проблемы. В результате таких исследований было разработано несколько методов синтеза систем управления для нелинейных объектов, каждый из которых даёт системы с различными свойствами. Поэтому возникла необходимость сравнить некоторые методы, чтобы определить, какой из них является достаточно простым и позволяет найти нелинейную систему с лучшими свойствами. С этой целью, в данной работе сравниваются допустимые области начальных условий, при которых созданные различными методами нелинейные системы управления являются работоспособными. Рассматриваются два аналитических метода проектирования систем управления различными нелинейными техническими объектами, такими как мобильные роботы и многие другие объекты. Это алгебраический полиномиально-матричный метод, использующий квазилинейную модель, и метод линеаризации обратной связью, использующий приведение заданных нелинейных уравнений объекта к форме Бруновского. Оба рассмотренных метода дают ограниченную область притяжения положения равновесия полученных систем управления, поэтому эти системы могут работать только с ограниченными начальными условиями. В статье приведен численный пример проектирования систем управления для одного объекта этими двумя методами. Оценки областей притяжения равновесия этих систем определяются с помощью MATLAB. В результате установлено, что алгебраический полиномиально-матричный метод позволяет обеспечить большую область допустимых начальных условий, по сравнению с методом линеаризации обратной связью. Кроме того, алгоритм синтеза нелинейных систем управления алгебраическим полиномиально-матричным методом является более простым и полностью выполняется на компьютере. Это позволяет считать, что решение задач проектирования систем управления нелинейными объектами целесообразнее выполнять алгебраическим полиномиально-матричным методом.

Нелинейный объект; ограниченные начальные условия; область притяжения; алгебраический полиномиально-матричный метод; метод линеаризующих обратных связей.

Mohammad Jalal Almashaal

TO ESTIMATION OF ATTRACTION AREA OF EQUILIBRIUM IN NONLINEAR CONTROL SYSTEMS

Designing nonlinear control systems is still difficult, so many researchers are trying to find some useful ways and methods to solve this problem. As a result of such research, some methods have been seen trying to design a good enough control system for nonlinear plants. But a disadvantage of these methods is the complexity, so it created a need to compare some methods to determine which one is the easiest method to design a control system for nonlinear plants. It was found a way to compare two methods, which is comparing the regions of initial conditions of the

systems which are designed using these methods. Two analytical nonlinear control systems design methods are compared on the example of the design control systems mobile robots. The algebraic polynomial-matrix method uses a quasilinear model, and the feedback linearization method uses particular feedback. Both considered methods give a bounded domain of equilibrium attraction, therefore the obtained control systems can be operated only with bounded initial conditions. The numerical example of designing the control systems for one object by these methods and the estimates of the attraction areas of the system's equilibriums in these systems are given in the paper. As a result of this paper, it was found that using the algebraic polynomial-matrix method will get a bigger section of initial conditions of the plant's variable than the same section which is given by the feedback linearization method.

Nonlinear plant; bounded initial condition; attraction area; algebraic polynomial-matrix method; linearizing feedbacks method.

Introduction. Real-world systems are inherently nonlinear in nature at least when considered over a wide operating range [1]. Recently, an active interest in the design and analysis of nonlinear control systems has been shown in much research like process control, biomedical engineering, robotics, and spacecraft control [2]. One of the most effective reasons behind the growing interest in nonlinear control includes the need to deal with model uncertainties and design simplicity [3].

A lot of researchers have tried designing an effective nonlinear control. New research has been conducted to simplify the process of designing nonlinear systems using transformation methods [4, 5]. Usually, the nonlinear plant equations are transformed into such forms as the feedback linearization method [4–6], regularization method [7], passivity method [8–10], backstepping method [11], Jordan controlled form method [12], quasilinear model method [13, 14], position control method [15, 16], and others.

The aim of this paper is to find the areas of the initial conditions in which the control systems for one nonlinear plant are still asymptotically stable. In addition to finding a control system that is designed by two analytical methods and making a comparison between them to decide which design method gives a wider area of attraction under initial conditions.

This paper consists of 5 parts. The first is an introduction, the second one is a definition of the algebraic polynomial-matrix (APM) method, which uses the quasilinear model, the third part is a short definition of the feedback linearization method, and the fourth part is devoted to giving an example in order to evaluate the resulted area of attraction which is given by these two methods, and the last part is the conclusion.

Algebraic polynomial-matrix method. This method is used for the design a control system of linear or nonlinear objects of arbitrary order, which are given as quasilinear model and have the form

$$\dot{x} = A(x)x + b(x)u, \quad y = c^T(x)x. \quad (1)$$

In this case, the desired control model is given in the form

$$u = u(g, x) = k_0(x)g - k^T(x)x = k_0(x)g - [k_1(x)x_1 + k_2(x)x_2 + \dots + k_n(x)x_n], \quad (2)$$

where $k_i(x)$ are the coefficients of the matrix-row $k^T(x)$ calculated during the design, which are the feedback coefficients on state variables x_i in a closed system, $i = \overline{1, n}$; and $g = g(t)$ is the setting action. Usually, $g(t) = g_0 * 1(t)$ [17, 18].

Substituting (2) into (1) shows that the mathematical model of a closed system will also have the form corresponding to the structure of a quasilinear model, i.e.

$$\dot{x} = D(x)x + k_0(x)b(x)g, \quad (3)$$

where $D(x)$ is also a functional matrix of the same dimension as $A(x)$. The structure of the matrix $D(x)$, as follows from the substitution, is determined by the following expression:

$$D(x) = A(x) - b(x) \cdot k^T(x). \quad (4)$$

For determining $k_i(x)$ are found polynomials which have the form

$$A(p, x) = \det(pE - A(x)) = p^n + \alpha_{n-1}(x)p^{n-1} + \dots + \alpha_1(x)p + \alpha_0(x), \quad (5)$$

$$V_i(p, x) = e_i \cdot \text{Adj}(pE - A(x)) \cdot b(x) = v_{i,n-1}p^{n-1}(x) + \dots + v_{i,1}(x)p + v_{i,0}(x), \quad (6)$$

In these expressions $\alpha_i(x)$ are the coefficients of the characteristic polynomial of the matrix $A(x)$ of the controlled object (1); e_i - i -th row of the identity $n \times n$ -matrix E ; $\text{Adj}(pE - A(x))$ is the attached matrix; $v_{ij}(x)$ are the coefficients of the polynomials $V_i(p, x)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{0, n-1}$.

A polynomial is formed

$$D^*(p) = \prod_{i=1}^n (p - p_i^*) = p^n + \delta_{n-1}p^{n-1} + \delta_{n-2}p^{n-2} + \dots + \delta_1p + \delta_0. \quad (7)$$

where δ_i are any positive numbers for which the roots of the polynomial $D^*(p)$ are real, distinct and negative. Next, the difference of polynomials $D^*(p)$ and $A(p, x)$ and its coefficients are determined:

$$R(p, x) = D^*(p) - A(p, x) = \bar{\delta}_{n-1}p^{n-1} + \bar{\delta}_{n-2}(x)p^{n-2} + \dots + \bar{\delta}_1(x)p + \bar{\delta}_0(x). \quad (8)$$

A system of algebraic equations is compiled:

$$\begin{bmatrix} v_{1,0} & v_{2,0} & \cdots & v_{n,0} \\ v_{1,1} & v_{2,1} & \cdots & v_{n,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{1,n-1} & v_{2,n-1} & \cdots & v_{n,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\delta}_0 \\ \bar{\delta}_1 \\ \vdots \\ \bar{\delta}_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

The matrix $D(x)$ is calculated by use expression (4). The coefficient $k_0(x)$ from (2) is found with condition $y^0 = g_0$ by the formula

$$k_0(x^0) = \frac{-1}{c^T(x^0)D^{-1}(x^0)b(x^0)}, \quad (10)$$

where $y^0 = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$, $x^0 = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$.

Feedback Linearization method. To apply this method, the equation (1) is represented:

$$\dot{x} = \tilde{A}(x) + b(x)u_2, \quad (11)$$

A controllability matrix has the form in this case

$$U_2 = (b, [\tilde{A}, b], \dots, [\tilde{A}, ad_{\tilde{A}}^{n-1}b]), \quad (12)$$

in expression (12) $ad_{\tilde{A}}^0 b = b$; $ad_{\tilde{A}}^1 b = [\tilde{A}, b] = (\partial b / \partial x)\tilde{A} - (\partial \tilde{A} / \partial x)b$; $ad_{\tilde{A}}^i b = [\tilde{A}, ad_{\tilde{A}}^{i-1}b]$, ... is a derivative of vector field b in direction of $\tilde{A}(x)$ [21]. If the determinate of controllability matrix (12) doesn't equal to zero and columns are involute, the transformation $z(x) = T_1(x)$ are determined from conditions

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} ad_A^i b = 0, \quad i = \overline{0, n-2}, \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} ad_A^{n-1} b \neq 0. \quad (13)$$

The transformation $z(x)$ allows to find feedback $u_2(x)$, which converts the system (11) into linear Brunovsky form with control v . Then the linear stabilizing control $v = v(z)$ can be determined very easily, and the transformation $z(x)$ will give required control $u_2 = u_2(x) = v(z(x))$.

To evaluate the area of attraction of the equilibrium of nonlinear control systems, we need firstly to design the control, which makes the system asymptotically system. Then max and min of each of the initial conditions of the plant's variables in which the system is still stable determined, to do that, will take an example.

Example. Suppose a pendulum is described as a form [19]

$$A(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 5w(x_1) & 0 & 2 \\ 7w(x_1) & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad b(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

Where $w(x_1) = x_1^{-1} \sin x_1$; $A(x) = [a_{ij}(x)]$ is a functional $n \times n$ -matrix, $b(x) = [b_i(x)]$ is functional n -vector [21]. To find the stabilizing control for (14) by the considered methods.

Design by using algebraic polynomial-matrix method. According to this method firstly we need to check satisfying of the controllability condition [13]. In this case $\det U_1(x) = -36x_1^{-1} \sin x_1$. So we can find a control system only if $|x_1| < \pi$. The polynomials can be determined as [20]:

$$\begin{aligned} A(p, x) &= \det(pE - A(x)) = p^3 - p^2 + \alpha_1(x)p + \alpha_0(x), \\ V_1(p, x) &= e_1 \text{Adj}(pE - A(x))b = 2p, \\ V_2(p, x) &= e_2 \text{Adj}(pE - A(x))b = 2p^2 \\ V_3(p, x) &= e_3 \text{Adj}(pE - A(x))b = p^2 + 9w(x_1), \end{aligned} \quad (15)$$

where $\alpha_1(x) = -5w(x)$; $\alpha_0(x) = -9w(x)$, e_i is i -th a line of a unit matrix of E .

Let the desirable Hurwitz polynomial $D^*(p) = p^3 + \delta_2^* p^2 + \delta_1^* p + \delta_0^*$ of the matrix $D_1(x) = A(x) - b(x)k^T(x)$ and $R(p, x) = D^*(p) - A(p, x) = (\delta_2^* + 1)p^2 + (\delta_1^* + 5w(x_1))p + \delta_0^* + 9w(x_1)$. Therefore, polynomials (15) will led to create the algebraic system:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 9w(x_1) \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1(x) \\ k_2(x) \\ k_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0^* + 9w(x_1) \\ \delta_1^* + 5w(x_1) \\ \delta_2^* + 1 \end{bmatrix}, \quad |x_1| < \pi, \quad (16)$$

where $k_i(x)$ are some nonlinear functions, $i = 1, 2, \dots, n$ [21]. The solution of system (16) gives the required control: $u_1(x) = -[0, 5\delta_1^* + 2, 5w(x_1)]x_1 - [0, 5\delta_2^* - \delta_0^* / 18w(x_1)]x_2 - [-1 + \delta_0^* / 9w(x_1)]x_3$, $|x_1| < \pi$.

Design by using feedback linearization method. According to this method, here $\tilde{A}(x) = [x_2 \quad 5 \sin x_1 + 2x_3 \quad 7 \sin x_1 + x_3]^T$, $b(x) = [0 \quad 2 \quad 1]^T$. To find the transformation $z(x)$ we need first to find the controllability matrix $U_2 = (b \quad ad_A^1 b \quad ad_A^2 b) = (b \quad [\tilde{A}, b] \quad [\tilde{A}, [\tilde{A}, b]])$. In this case

$$ad_{\tilde{A}}b = (\partial b / \partial x)\tilde{A} - (\partial\tilde{A} / \partial x) \cdot b = [-2 \quad -2 \quad -1]^T. \quad (17)$$

$$\begin{aligned} ad_{\tilde{A}}^2b &= ad_{\tilde{A}}(ad_{\tilde{A}}b) = (\partial(ad_{\tilde{A}}b) / \partial x)\tilde{A}(x) - (\partial\tilde{A} / \partial x)ad_{\tilde{A}}b = \\ &= [2 \quad 10\cos x_1 + 2 \quad 14\cos x_1 + 1]^T. \end{aligned} \quad (18)$$

According to (17), (18), the controllability matrix has form

$$U_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & -2 & 2 \\ 2 & -2 & 10\cos x_1 + 2 \\ 1 & -1 & 14\cos x_1 + 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

The $\det U_2 = 36\cos x_1$ and columns of the matrix (19) form an involute set, i.e. the controllability condition is satisfied if only $|x_1| < \pi / 2$ [20].

Now we can define the transformation $z(x) = T(x) = [T_1(x) \quad T_2(x) \quad T_3(x)]^T$ starting from the function $T_1(x)$; this function is determined in [20]:

$$T_{1x}(x)b = 2T_{1,x2} + T_{1,x3} = 0, \quad (20)$$

$$T_{1x}(x)ad_{\tilde{A}}b = -2T_{1,x1} - 2T_{1,x2} - 2T_{1,x3} = 0, \quad (21)$$

$$T_{1x}(x)ad_{\tilde{A}}^2b = -2T_{1,x1} + (10\cos x_1 + 2)T_{1,x2} + (14\cos x_1 + 1)T_{1,x3} \neq 0. \quad (22)$$

The conditions (20), (21) and (22) are used to define the function $T_1(x) = T_1(x_1, x_2, x_3)$ which can be any function that satisfies these three conditions [20]. From the conditions (20) we can say that $T_1(x)$ depends only on x_2 and x_3 . On the basis of a condition (21), (22) it is possible to accept $T_1(x) = x_2 - 2x_3 = z_1$ as the simplest function.

The function $T_{2x}(x)$ is defined from expression $T_2(x) = T_{1x}\tilde{A}(x) = -9\sin x_1 = z_2$. Similarly, $T_{3x}(x)$ can be defined by expression: $T_3(x) = T_{2x}\tilde{A}(x) = -9x_2\cos x_1 = z_3$. It will easily be convinced that the transformation

$$z(x) = T(x) = \begin{bmatrix} x_2 - 2x_3 \\ -9\sin x_1 \\ -9x_2\cos x_1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

transforms the equation (11) where $\tilde{A}(x) = [x_2 \quad 5\sin x_1 + 2x_3 \quad 7\sin x_1 + x_3]^T$, $b(x) = [0 \quad 2 \quad 1]^T$ into the linear equation of Brunovsky form:

$$\dot{z} = [z_2 \quad z_3 \quad v]^T. \quad (24)$$

Control $v(z)$ at which the linear system (24) is asymptotically stable evidently has an appearance $v = -\delta_0 z_1 - \delta_1 z_2 - \delta_2 z_3$, at which the equation (24) passes into the equation

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\delta_0 & -\delta_1 & -\delta_2 \end{bmatrix} z. \quad (25)$$

Here the coefficients δ_i are chosen according to the requirements to character and duration of transient of the control system (25).

The desired stabilizing control is obtained in form

$$u_2(x) = \frac{\delta_0(2x_3 - x_2) + 9\delta_1 \sin x_1 + 9\delta_2 x_2 \cos x_1}{18 \cos x_1} + \frac{5}{2} \sin x_1 + x_3 - \frac{x_2^2}{2} \tan x_1, \quad |x_1| < \pi / 2. \quad (26)$$

Further, we assert since the transformation $z(x)$ is reversible, i.e. a nonsingular transformation $x(z)$ exists, then the systems (14), (26) are also asymptotically stable ($\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$) if $|x_1(t, x_0)| < \pi / 2$.

Modeling the systems using MATLAB with the designed control by using the two methods was shown in [13], and it was noticed that both controls make the system asymptotically stable with a duration of transient not more than 1.6 sec. Apparently from the stated above expressions the domain of equilibrium attraction of the control systems obtained using the compared methods is bounded that is caused by the controllability conditions of each method. Therefore, these systems can be operated only with bounded initial conditions.

To find the boundary of initial conditions using MATLAB, the region of initial conditions of each control system can be found in which the designed control system is still stable. This region of initial conditions of the control system is designed by the APM method shown in Fig. 1,a, and Fig. 1,b shows the same region of initial conditions of the system is designed using the feedback linearization method.

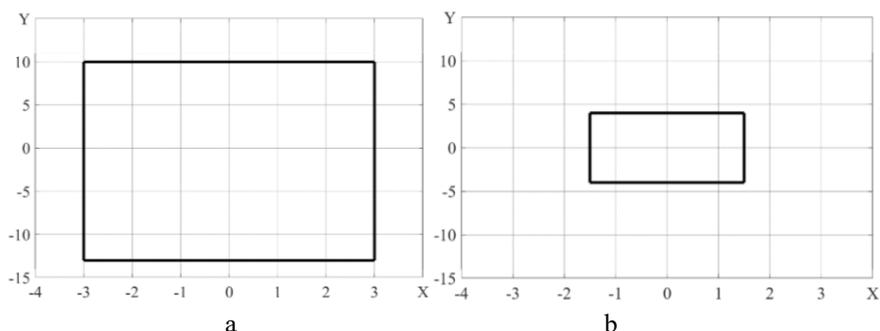


Fig. 1. Section of region of initial conditions is given by the compared methods

It is noticed that the section of a region of initial conditions of the system which is designed by APM method is bigger about 6 times than the same region of the designed system using feedback linearization method. Also, it can be noticed that the obtained section has two dimensions, where the first dimension describes the variable x_1 , also the variable x_2 is described by the second dimension of the section, where this section was found by determining the maximum value of each variable in which the designed control system makes the system asymptotically stable.

Conclusion. As a result of the study, it was found that both methods make it possible to synthesize a control system for nonlinear objects, but only if the condition of object controllability is satisfied. Nonlinear control systems obtained by both methods are asymptotically stable, but they have different regions of attraction of equilibrium. The algebraic polynomial matrix method is simpler than the feedback linearization method. This is due to the fact that the algorithm of the algebraic polynomial-matrix method has certain steps, performing which we get a nonlinear control system, spending less time and effort. At the same time, the feedback linearization method contains steps that require quite complex, but

this method doesn't completely define the transformations that must be performed to obtain a mathematical model of the control system in the Brunovsky form. In this paper, it is established that the feedback linearization method leads to a nonlinear control system with a smaller range of acceptable initial conditions for state variables, in which the control system is asymptotically stable. The algebraic polynomial-matrix method gives a large range of initial conditions under which the designed control system is stable. These conclusions follow from the above sections of the attraction regions of both systems. In the future, it is supposed to define the region of initial conditions as a region of three-dimensional space, since the systems have an order equal to three.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Iqbal J., Ullah M., Khan S., Baizid K., Cukovic S.*, Nonlinear control systems – A brief overview of historical and recent advances // *Nonlinear Engineering*. – 2015. – P. 301-312.
2. *Ajwad S., Iqbal J., Ullah M., Mehmood A.*, A systematic review of current and emergent manipulator control approaches // *Front Mech Eng China*. – 2015. – P. 198-210.
3. *Slotine J., Li W.* Applied nonlinear control // Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991. – P. 1-459.
4. *Isidori A.*, Lectures in Feedback Design for Multivariable Systems // *Advanced Textbook in Control and Signal Processing*. – London, Springer, 2016. – P. 414.
5. *Tuan, H.T., Trinh, H.A.*, Linearized Stability Theorem for Nonlinear Delay Fractional Differential Equations // *IEEE Trans. Automat. Control*. – 2018, – Vol. 63, No. 9. – P. 3180-3186.
6. *Воевода А.А., Филюшов, В.В.* Линеаризация обратной связью // *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. – 2016. – № 2 (84). – С. 68-76.
7. *Лукьянов А.Г., Уткин В.И.* Методы сведения уравнений динамических систем к регулярной форме // *Автоматика и телемеханика*. – 1981. – Т. 4. – С. 5-13.
8. *Madeira D. de S., Adamy J.*, Feedback Control of Nonlinear Systems Using Passivity Indices // *Proc. IEEE Conference on Control Applications*. – Sydney, Australia. – 2015. – P. 263-268.
9. *Byrnes S., Isidori A., Willems J.*, Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1991. – Vol. 2, No. 36. – P. 1228-1240.
10. *Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis J.*, Control Design Using Passivation for Stability and Performance // *IEEE Transactions on control*. – 2018. – Vol. 63, No. 9. – P. 2987-2993.
11. *Ascencio, P., T. Astolfi, T., T. Parisini, T.*, Backstepping PDE Design: A Convex Optimization Approach // *IEEE Trans. Automat. Control*. – 2018. – Vol. 63, No. 7. – P. 1943-1958.
12. *Гайдук А.Р.* Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // *Автоматика и телемеханика*. – 2006. – № 7. – С. 3-13.
13. *Gaiduk A.R.*, Nonlinear Control Systems Design by Transformation Method // *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2018. – Vol. 19, No. 12. – P. 755-761.
14. *Гайдук А.Р.* К синтезу квазилинейных гурвицевых систем управления // *Тр. СПИИРАН*. – 2019. – Т. 1, Т. 18, № 3. – С. 678-705.
15. *Пилюхов В., Медведев М.*, Позиционное управление транспортными средствами с многоконтурной адаптацией // *Журнал инженерных и прикладных наук*. – 2018, – № 13. – С. 8921-8928.
16. *Капустян С.Г., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В.* Метод робастно устойчивого управления движением группы мобильных роботов с «лидером» для системного мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры. системы опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры // *Наука Юга России*. – 2021. – Т. 1, № 2. – С. 66-73.
17. *Gaiduk A.R., Neidorf R.A., Kudinov N.V.*, Application of the Cut-Glue Approximation in the Analytical Solution of the Nonlinear Control Synthesis Problem // *Cyber-Physical Systems: Challenges of Industry 4.0*. – Springer, 2020. – P. 117-132.
18. *Izadi M.; Srivastava H.M.*, Application of the generalized method of Bessel quasi-linearization to equations of Bratou and Lane–Emden type of arbitrary order // *Fractal Fract*. – 2021. – No. 5. – P. 179.
19. *Гришин А.А., Ленский А.В., Охоцимский Д.Е., Панин Д.А. Формальский, А.М.*, Синтез управления для неустойчивого объекта. Перевернутый маятник // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2002. – Т. 5. – С. 14-24.

20. Гайдук А.П., Капустян С.Г., Алмашаал М.Д., Сравнение методов проектирования нелинейных систем управления // Вестник ИСПУ. – 2021. – №. 4. – С. 21-24.
 21. Bela L., Lorink M., Nonlinear control of vehicles and robots. – Springer, 2011. – 356 p.

REFERENCES

1. Iqbal J., Ullah M., Khan S., Baizid K., Cukovic S. Nonlinear control systems – A brief overview of historical and recent advances. *Nonlinear Engineering*, 2015, pp. 301-312.
2. Ajwad S., Iqbal J., Ullah M., Mehmood A. A systematic review of current and emergent manipulator control approaches. *Front Mech Eng China*, 2015, pp.198-210.
3. Slotine J., Li W. Applied nonlinear control, *Prentice-Hall Englewood Cliffs*, NJ, 1991, pp. 1-459.
4. Isidori A. Lectures in Feedback Design for Multivariable Systems. *Advanced Textbook in Control and Signal Processing*. London, Springer, 2016. pp. 414.
5. Tuan, H.T., Trinh, H.A. Linearized Stability Theorem for Nonlinear Delay Fractional Differential Equations. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2018, Vol. 63, No. 9, pp. 3180-3186.
6. Voevoda, A.A., Filyushov, V.Y. Linearizatsiya obratnoy svyaz'yu [Feedback Linearization]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, No. 2 (84), pp. 68-76.
7. Luk'yanov, A.G., Utkin, V.I. Metody svedeniya uravneniy dinamicheskikh sistem k reguliruyemy formе [Methods for Reducing Equations of Dynamical Systems to a Regular Form]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1981, No. 4, pp. 5-13.
8. Madeira D. de S., Adamy J. Feedback Control of Nonlinear Systems Using Passivity Indices. *Proc. IEEE Conference on Control Applications*. Sydney, Australia, 2015, pp. 263-268.
9. Byrnes S., Isidori A., Willems J., Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, Vol. 2, no. 36, pp. 1228-1240.
10. Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis J. Control Design Using Passivation for Stability and Performance, *IEEE Transactions on control*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 2987-2993.
11. Ascencio P., T. Astolfi, T., T. Parisini T. Backstepping PDE Design: A Convex Optimization Approach, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2018, Vol. 63, No. 7, pp. 1943-1958.
12. Gaiduk, A.R., Sintez nelineynykh system na osnove upravlyaemoy formy Zhordana [Synthesis of Nonlinear Systems Based on Controlled Jordan Form]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2006, No. 7, pp. 3-13.
13. Gaiduk, A.R. Nonlinear Control Systems Design by Transformation Method. *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, Vol. 19, No. 12, pp. 755-761.
14. Gaiduk, A.R. K sintezu kvazilineynykh gurvitsevykh sistem upravleniya [On Synthesis of Quasilinear Hurwitz Control Systems]. *Trudy of SPIIRAN*, 2019, Vol. 18 (3), pp. 678-705
15. Pshikhopov, V., Medvedev, M. Position Control of Vehicles with Multi-Contour Adaptation. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, Vol. 13, pp. 8921-8928.
16. Kapustyan, S.G., Orda-Zhigulina, M.V., Orda-Zhigulina, D.V. Metod robustno ustoychivogo upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov с «liderom» dlya sistem monitoringa i prognozirovaniya opasnykh protsessov i obespecheniya bezopasnosti naseleniya i beregovoy infrastruktury [Method of robustness stable control of the movement of a mobile robots group with “leader” for monitoring and forecasting systems of hazardous processes and ensuring the safety of the population and coastal infrastructure]. *Nauka Yuga Rossii*, 2021, Vol. 17, No. 2, pp. 66-73.
17. Gaiduk A.R., Neidorf R.A., Kudinov N.V. Application of the Cut-Glue Approximation in the Analytical Solution of the Nonlinear Control Synthesis Problem. *Cyber-Physical Systems: Challenges of Industry 4.0*. Springer, 2020, pp. 117-132.
18. Izadi, M.; Srivastava, H.M., Application of the generalized method of Bessel quasilinearization to equations of Bratou and Lane–Emden type of arbitrary order. *Fractal Fract.* 2021, no. 5, p. 179.
19. Grishin, A.A., Lenskiy, A.V., Okhotsimskiy, D.E., Panin, D.A. Formal'skiy, A.M. Sintez upravleniya dlya neustoychivogo ob"ekta. Perevernutyy mayatnik [A Control Synthesis for an Unstable Object. An Inverted Pendulum]. *Izvestiya RAN. Teoriya I sistemy upravleniya*, 2002, Vol. 5, pp. 14-24.

20. Gaiduk A.R., Kapustyayn S.G., Almashaal M.J. Methods Comparison of nonlinear control systems design, *Journal "Vestnik ISPU"*, 2021, No. 4, pp. 21-24.
21. Bela L., Lorink M. Nonlinear control of vehicles and robots, Springer, 2011, 356 pp.

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

Алмашаал Мохаммад Джалаль – Южный федеральный университет; e-mail: almashaal.jalal@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79287505715; аспирант.

Almashaal Mohammad Jalal – Southern Federal University; e-mail: almashaal.jalal@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79287505715; graduate student.

УДК 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-14-26

С.Л. Беляков, А.В. Боженюк, Н.А. Голова, И.Н. Розенберг, К.С. Яворчук

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

Работа посвящена анализу механизмов формирования рекомендаций и оценки реакции на них в интерактивном режиме работы пользователя с геоинформационной системой. Одной из важных областей применения рекомендательных систем является поиск и принятие решений в пространственных ситуациях. Особенностью данного класса задач является неопределенность постановки задач и неоднозначность оценивания решений. Пользователи зачастую сталкиваются с проблемами, которые не имеют четкой формулировки. Стремление их разрешить потребует не только выбора направления поиска решения, но и нахождения адекватной последовательности задач с четко оформленными входными и выходными данными. Рекомендации в таких случаях призваны в диалоге с пользователем-аналитиком планировать стратегию поиска решений. В настоящей работе исследуется интеллектуальная рекомендательная система, использующая опыт диалогового взаимодействия в процессе изучения проблемы. Предлагается модель адаптации к ментальному образу проблемы, который строит пользователь, с учетом уровней его ситуационной осведомленности и когнитивной нагрузки. Особенность модели в использовании визуальных картографических объектов, являющихся индикаторами состояния ментального образа. Рекомендация представляется набором объектов, которые внедряются в область картографического анализа. Тем самым неявно индуцируется определенное смысловое направление повышения ситуационной осведомленности. Предлагается критерий удовлетворенности рекомендациями. Приводится диаграмма состояний рекомендательной системы, описывающая подбор адекватного решаемой проблеме контекста. Под контекстом понимается информационный объект, способный предоставлять программные функции и данные для решения задач ограниченного класса. Последовательность контекстов в сеансе анализа рассматривается как прецедент опыта. Для возможных цепочек контекстов предложены показатели тренда, тенденции и ритма. Через данные показатели оценивается степень смысловой близости прецедентов текущему ходу поиска решения. Их использование позволит повысить скорость адаптации.

Рекомендательная система; интеллектуальная геоинформационная система; ситуационный анализ; представление знаний; принятие решений.

**S.L. Belyakov, A.V. Bozhenyuk, N.A. Golova, I.N. Rosenberg,
K.S. Yavorchuk**

INTELLIGENT RECOMMENDER SYSTEM FOR SPATIAL ANALYSIS

The work is devoted to the analysis of mechanisms of formation of recommendations and evaluation of the user's reaction to them in the interactive mode of work with the geoinformation system. One of the important areas of application of recommender systems is the search and decision-making in spatial situations. A peculiarity of this class of problems is the uncertainty of task

definition and ambiguity of decision evaluation. Users are often faced with problems that do not have a clear formulation. To try to solve them, it is necessary not only to designate the direction of solution search, but also to find an adequate sequence of tasks with clearly formulated input and output data. Recommendations in such cases are designed in a dialogue with the user-analyst to develop a strategy for finding solutions. In this paper we study a smart recommendation system using the experience of dialog interaction. We propose a model of adaptation to the mental image of the problem, which builds the user, taking into account the levels of situational awareness and cognitive load. The peculiarity of the model is the use of visual cartographic objects, which are indicators of the state of the mental image. A recommendation is represented by a set of objects that are introduced into the field of cartographic analysis. This implicitly induces a certain semantic direction of increasing situational awareness. A criterion of satisfaction with the recommendation is suggested. A diagram of recommender system states, which describes the selection of context, adequate to the problem being solved, is given. The context is understood as an information object, capable of providing program functions and data for solving problems of a limited class. A sequence of contexts in an analysis session is considered as a precedent of experience. Indicators of trend, tendency and rhythm are proposed for possible chains of contexts. The degree of semantic proximity of precedents to the current course of search for a solution is estimated by these indicators. Their use will increase the speed of adaptation.

Recommender system; intelligent geoinformation systems; situational analysis; knowledge mining; decision making.

Введение. Процесс решения разнообразных задач, в том числе с использованием геоинформационных сервисов (ГИС), может иметь принципиальное различие, известное из когнитивной психологии [1, 2]. Выделяют решение задач и решение проблем. В первом случае предполагается известной цель и стратегия ее достижения, но недостает информации и знаний для реализации отдельных шагов. Это заставляет аналитика, стремящегося достичь результата, восполнять дефицит привлечением внешних источников пространственных данных и знаний. Решение проблемы отличается отсутствием четкого представления о цели и стратегии ее достижения. Подобная неопределенность требует от аналитика применения эвристик и визуально изучать пространственные представления данных и знаний с целью создания ментального образа проблемы в своем сознании. Совместная работа ГИС и аналитика способна привести к результату, который наиболее ценен в применении интеллектуальных систем – получению нового знания и его применению в ранее не известных условиях.

В процессе поиска решения проблемы ГИС отводится роль интеллектуального партнера, рекомендующего визуально изучать картографические изображения с нужными свойствами. Известно, что одна и та же пространственная область может быть показана на экране различным числом вариантов. Комбинируя классы объектов и отношений, ГИС способна порождать у аналитика разнообразные ментальные образы. По этой причине практический интерес представляет реализация рекомендательного сервиса в мобильном устройстве. Отличительными особенностями такой реализации является работа в режиме клиент-сервер, ограничения на ресурсы визуализации клиента, доступность пространственного положения аналитика и возможность отслеживать его динамику, а также наблюдаемость параметров состояния среды.

Важно иметь в виду, что мобильное приложение реализует задачу поиска информации, полезность которой определяется состоянием пользователя-аналитика. Состояние – это данные о ментальном представлении аналитика о смысле поставленной задачи, стратегии поиска ее решения и текущей оценке достигнутого результата. По очевидным причинам получить эту информацию явно и напрямую идентифицировать состояние пользователя не удастся. Следовательно, мобильное приложение должно приближенно оценивать состояние аналитика и рекомендовать ему изучить соответствующие его состоянию картографические материалы. Успешность рекомендаций оценивается косвенно.

В настоящей работе исследуются вопросы: как адаптироваться к неопределенности, каковы формы представления знаний и опыта пространственного анализа, как устроен механизм смыслового наполнения потока картографических данных.

Постановка задачи. Рассматривается мобильная система, которая в диалоге с пользователем решает прикладную проблему пространственного характера, отличающуюся следующими особенностями:

- ◆ пользователь не имеет четкой формулировки задачи, позволяющей применить имеющиеся в мобильном приложении программные инструменты для получения решения;

- ◆ пользователь ищет решение путем изучения пространственной области для создания ментального образа задачи. Ментальный образ – целостное представление о цели и признаках ее достижения;

- ◆ в ходе пространственного анализа пользователем варьируются смысловые направления отбора пространственных данных и их визуального представления. Цель этих действий – достижение достаточного для принятия решения уровня ситуационной осведомленности;

- ◆ с течением времени растет когнитивная нагрузка пользователя, обусловленная необходимостью отбирать полезные данные из общего потока получаемой пространственной информации. Рост когнитивной нагрузки отрицательно сказывается на целостности ментального образа задачи.

Как возможный путь организации процесса поиска и принятия решения, далее рассматривается рекомендательный режим проведения пространственного анализа. Он заключается в том, что всякий ответ на запрос серверу пространственных данных является рекомендацией, включающей в себя полезную для принятия решения информацию. Полезность рекомендации обеспечивается использованием контекста, который подбирается соответственно ходу диалога.

Чтобы реализовать указанный подход, следует проанализировать задачи: что представляет собой механизм адаптации рекомендательной системы к ходу пространственного анализа и какова роль знаний в представлении и использовании контекста.

Обзор известных исследований. Пространственный анализ является универсальным инструментом, который применим в разнообразных ситуациях. Этим определяется популярность и широкое распространение геоинформационных технологий [3]. Целью пространственного анализа является выявление пространственных объектов и отношений, знание которых позволит аналитику принять более эффективное решение. Такая возможность особенно важна для мобильных систем, которые изначально предполагают изменение своего пространственного положения. Научные исследования в направлении создания универсальных инструментов пространственного анализа обширны [3, 4]. Их отличает разнообразие, порожденное не только различным смыслом решаемых проблем, но и степенью обобщения в разработке формальных методов. Однако, уместное применение того или иного инструмента остается субъективным выбором аналитика. Как следствие, возникает необходимость обращения к практическому опыту выполнения пространственного анализа. Этот аспект остается неисследованным.

Совместная работа аналитика с геоинформационным сервисом продолжает находиться в центре исследований [5]. Особенная роль визуального интерфейса состоит в том, что он является и инструментом, и результатом пространственного поиска. Визуальное изучение фрагментов пространства в разном масштабе, оформлении, тематике порождает в сознании аналитика целостный ментальный образ пространства. Для этого он реализует некоторую познавательную стратегию. Ее реализация должна поддерживаться геосервисом в двух направлениях – предоставления интуитивного интерфейса (UX) и интуитивно понимаемых ответов на запросы. Первая задача исследуется давно и поставлена в основополагающих ра-

ботах в области геоинформатики [6]. Автор упоминаемой работы указывает на основное свойство интерфейса – соответствовать и способствовать пространственному мышлению пользователя. В области мобильных устройств эта тема развивается достаточно независимо [7]. Предметом исследований являются сенсорные компоненты и психо-физические особенности восприятия. Что касается дизайна ответов на пространственные запросы, то пространственный анализ обладает спецификой. Из-за непрерывности пространства всякая совокупность объектов или отношений не может быть «вырвана» из контекста анализа. Эта совокупность должна быть дополнена объектами и отношениями, которые неявно соответствуют запросу. Эта задача изучена недостаточно.

Характер диалогового взаимодействия аналитика с мобильным приложением при пространственном анализе указывает на близость таких систем к рекомендательным [8]. Полученные пространственные данные можно рассматривать как рекомендации, полезные для принятия решений. Рассмотрим результаты исследований в области контекстно-зависимых рекомендательных систем.

Наиболее близкое направление исследований [9] связано с проектированием диалоговых систем, реализующих интеллектуальную поддержку некоторого аналитического процесса. Процесс может быть достаточно сложным и включать в себя поиск и анализ данных, моделирование прикладных процессов, выбор артефактов из репозитория аналитической системы, обмен сообщениями с профессиональной группой социальной сети, подготовку обобщающих отчетов, и т.д. Пользователь решает задачу 4W – who, what, when, where ? Перед системой информационной поддержки пространственного анализа ставится задача идентификации контекста. Если это не сделано, то с большой вероятностью информационный поток превратится в шум.

Первоочередной проблемой, которую ставят исследователи в этом случае, является определение состава контекста. В него могут быть включены очень разнородные информационные компоненты – от имени пользователя до географического положения предмета анализа. В работе [10] эта проблема решается введением набора конкретных факторов в количестве 13, объединенных в 4 группы (соответствующих 4W). Предложенная модель контекста далее подвергается статистической проверке с целью выявления корреляции каждого фактора в отдельности с применяемыми командами пользовательского интерфейса. Каждая ситуация, таким образом, представляет собой существенно важное изменение текущих значений параметров контекста. Соответственно ситуации вырабатывается решение о предоставлении аналитику некоторой дополнительной информации. Недостатком работ данного направления следует считать:

- ◆ использование единственного контекста, в котором интерпретируются ситуации. Исключена неоднозначность ситуаций в различных контекстах. Это ограничивает применение знаний о действиях, которые должны предприниматься в соответствующих ситуациях;
- ◆ для рекомендаций аналитику используются поверхностные знания, не отражающие логику применения опыта экспертов. Рекомендации аналитику формируются, исходя из фиксированных значений параметров контекста;
- ◆ достоверность принятых решений определяется экспериментальной подстройкой значений параметров контекста. Из-за этого возможна ситуация, когда изменение условий эксплуатации приведет к неконтролируемому ухудшению качества решений.

Исследования, связанные с синтезом контекстов, анализируют динамические и статические контексты [11], используют онтологии для их описания. Отличием данных исследований является описание метаонтологий и производных от них

онтологий, которые могут затем использоваться для повышения ситуационной осведомленности. Технической реализацией создания, хранения и использования онтологий являются онтологические сервисы. Первым шагом создания онтологии является приобретение знаний и структуризация контекста. Здесь определяется содержание онтологии. На следующем этапе моделирования создаются концепты, определяющие 5W(who, when, what, where and why). Предполагается, что именно на данном этапе создается статическая либо динамическая онтология. Используется понятие состояния онтологии: готова, используется, приостановлена, продолжена, завершена [11]. Логический вывод почти всегда применяется для того, чтобы преодолеть неопределенности и неоднозначности, неизбежные для контекстов. Наконец, на этапе распределения (распространения) онтологий предоставляется механизм доступа по запросу или подписки на использование.

Проблема достижения полноты контекста решается достаточно трудно. Это порождает исследования, использующие некоторые частные особенности контекстов. Например, привлекается аппарат скрытых марковских цепей [12] либо «внеконтекстных» правил, позволяющих распознать ситуацию в заданном контексте [13].

Необходимость использовать контексты при поиске информации давно известна как средство повышения качества поисковой выдачи [14]. Исследования в этой области ставят целью нахождение механизмов связывания контекстов с запросами пользователя и представлением (индексированием) документов в рамках определения контекста. В указанной выше работе предложено использовать онтологические профили для коллекций документов. Каждый профиль отражает содержание коллекции, специфицируя концепты и связи между ними. Каждому концепту сопоставляется вектор терминов и вектор весов терминов, обнаруженных в соответствующей коллекции документов. Авторы предлагают расширять запросы пользователя добавлением выражений, которые включают дополнительные термины рабочего профиля и исключают термины других профилей.

В работе [15] идея применения контекста, заданного онтологией, развита на более общий случай. Рассматриваются модели векторного и статистического ранжирования документов. Роль контекста в том, что при ранжировании предлагается учитывать весовые коэффициенты концептов уровня онтологии, сопоставленного текущему контексту.

Исследования применения контекстов для реализации рекомендательных систем специфичны тем, что решают проблемы компактности представления контекстов. Это обусловлено их применением в мобильных устройствах. Например, в работе [16] предложен подход для минимизации параметров контекста, использующий машинное обучение на данных сенсоров. По существу, речь идет о выделении существенных параметров контекста.

В работе [17] исследован другой аспект – комбинирование контекстов. В работе предложено некоторое частное решение по формированию рекомендации, основанное на использовании регистрационных данных пользователя социальной сети. Применение глубокого машинного обучения нейросети позволило ранжировать рекомендации за приемлемое время. Подобные исследования нуждаются в обобщении функций использования нескольких контекстов.

Экспериментально подтверждая практическую полезность использования контекстов при формировании рекомендаций [18], проведенные исследования ставят в качестве дальнейших направлений исследования адаптацию онтологий к контексту.

Контексты в системах принятия решений используются с целью снижения когнитивной нагрузки на оператора, предоставления знаний для принятия решений, повышения уровня ситуационной осведомленности. Как указано в работе [19], эволюция систем принятия решений в промышленности развивается по пути

распределенных вычислений. Это означает информационную поддержку чрезвычайно разнообразного смыслового наполнения. Как следствие, использование контекста принятия решений является принципиально необходимым. Характерно то, что ожидается рост охвата сетевых реализаций: как проводных, так и беспроводных сетей. Это важно с точки зрения общедоступности ресурсов, необходимых для принятия решений.

Как отмечается в работе [20], практическое применение систем поддержки принятия решений требует выявления соответствия ситуации известным, обобщения и детализации. Эти требования определяют основные направления исследований в рассматриваемой области. Авторы описывают макет мобильного приложения, которое частично реализует сформулированные принципы. Результаты подобных исследований могут использоваться главным образом для практической реализации систем принятия решений, так как не затрагивают вопросов представления и распространения знаний.

Применению моделей машинного обучения посвящен обзор [21]. В нем обстоятельно рассмотрены вопросы: направления и возможности применения ML для построения рекомендательных систем, особенность процесса обучения моделей, позволяющая добиваться положительного эффекта в решении задач, путей решения проблем неопределенности, неоднозначности и неточности опытных данных.

Из анализа публикаций можно сделать следующие выводы:

- ◆ мобильные приложения, реализующие пространственный анализ, наиболее близки к контекстно-зависимым рекомендательным системам. Использование их принципов организации в большей степени способствует достоверности рекомендаций. Построение и использование контекстов и рекомендаций для этого случая изучено недостаточно;

- ◆ выработка рекомендаций при пространственном анализе носит характер процесса. Конечное решение строится аналитиком как результат визуального изучения последовательности рекомендованных пространственных объектов и отношений. Такой режим работы контекстно-зависимых рекомендательных систем мало исследован;

- ◆ конечными показателями качества взаимодействия пользователя с рекомендательной системой являются ситуационная осведомленность и когнитивная нагрузка. Их следует использовать для оценки экспериментально реализованных вариантов системы;

- ◆ учитывая высокую роль адаптации рекомендательной системы к ментальному состоянию аналитика, малоперспективными представляются модели знаний из области ML. Необходим поиск модели представления знаний, которая отображает интуитивно понимаемый «смысл» пространственных ситуаций.

Принцип адаптации пространственного анализа. Рассмотрим, каким образом вырабатываются и представляются рекомендации. Будем считать, что картографическая база геосервиса является множеством объектов

$$O = \{o_1, o_1, \dots, o_{|O|}\}.$$

Пользователь, отправляя запросы на получение фрагментов местности, строит в мобильном приложении рабочую область

$$w_R \subset O, |w_R| \ll |O|.$$

В рабочую область включаются объекты, полученные по запросам

$$w_R = \cup_i q_i,$$

где q_0, q_1, \dots, q_Q – последовательность запросов, формируемых пользователем через интерфейс пространственного анализа. Следует обратить внимание, что пространственные запросы указывают условия отбора объектов, но не описывают важный

для картографического представления «фон», на котором они должны отображаться. Например, здания и сооружения в контексте оценки их расположения относительно водоемов не требуют отображения транспортной инфраструктуры. Если же речь идет об анализе транспортной доступности, это необходимо сделать обязательно. В противном случае целостность изображения нарушается. Поэтому, получая запрошенные данные, пользователь обычно вручную адаптирует нужным образом картографический «фон».

Представим рабочую область, созданную с применением рекомендаций, в виде

$$w_R = \cup_i (q_i \cup E_{c_k}(q_i)), \quad (1)$$

где $E_{c_k}(q_i)$ – функция конструирования рекомендации. Функция отображает множество картографических объектов ответа на запрос в установленном контексте c_k в дополнительный набор объектов. Этот дополнительный набор концентрирует восприятие и делает ответ на запрос в установленном контексте полезнее. Функция $E_{c_k}(q_i)$ программно реализуется как интерпретатор правил, задающих пространственную, временную и семантическую границы рабочей области. Правило связывает типы и экземпляры картографических объектов и отношений запроса с типами и экземплярами объектов рекомендации. Правила пространственного характера, кроме того, задают форму геометрической области, охватывающей ответ на запрос в целом.

Функция $E_{c_k}(q_i)$ является атрибутом контекста. Считается, что геосервис включает описание множества контекстов $C = \{c_k\}$. Представление (1) позволяет:

- ♦ включить рекомендации в диалог «прозрачным» для пользователя образом. Рекомендация не выделена как особый информационный объект, а встроена в изображение рабочей области;
- ♦ действия пользователя с объектами рекомендации (удаление, добавление или модификация) указывают неудовлетворенность аналитика и позволяют адаптироваться к его ментальному состоянию.

Последнее замечание представляет особый интерес. Поскольку ментальное состояние пользователя недоступно для прямого наблюдения, вывод об удовлетворенности диалогом можно оценить по его реакции на объекты рекомендации. Эти объекты не запрашивались напрямую и могут использоваться как индикатор.

Целью адаптации является выбор такого контекста $c_T \in C$ в котором рекомендации максимально полезны. С учетом (1) это означает, что воздействие пользователя на картографические объекты рекомендаций не превосходит заданного уровня:

$$n_T < | \cup_i E_{c_k}(q_i) |. \quad (2)$$

Здесь T есть временной интервал наблюдения за диалогом. Если ограничение (2) нарушено, рассогласование ментального образа и установленного контекста считается существенным. Далее следует процедура подбора контекста. На рис. 1 показана диаграмма состояний рекомендательной системы, отражающая процесс адаптации. Состояние «**Работа в установленном контексте**» соответствует непрерывному контролю величины расхождения n_T . Рекомендательная система находится в этом состоянии все время, в течение которого рекомендации согласуются с процессом анализа. При наступлении события «**Отклонение n_T значимо**» система переходит в состояние «**Поиск контекста**». В этом состоянии формируются рекомендации, соответствующие «нейтральному контексту». Рекомендации включают в себя объекты и отношения общегеографического содержания без какой-либо специализации. Поиск выполняется соответственно текущей локализации пользователя, области анализа на карте и истории использования контекстов в

текущем сеансе. В этом состоянии система может находиться сколь угодно долго, если при текущем состоянии диалога не удастся выработать решение, соответствующее (2). Если же в информационной базе удастся найти «*перспективный контекст*», выбор требуется подтвердить. Система переходит в состояние «*Подтверждение контекста*», в котором в течение заданного интервала времени t_{conf} выдаются частичные рекомендации. Частичной считается рекомендация

$$\tilde{E}_{c_k}(q_i) \subset E_{c_k}(q_i), |\tilde{E}_{c_k}(q_i)| = g(t)|E_{c_k}(q_i)|, 0 < g(t) < 1, 0 < t < t_{conf}.$$

Здесь $g(t)$ есть возрастающая функция времени. Пользователь в течение времени t_{conf} получает рекомендации с сокращенным числом объектов. Если за это время пользователь не предпринимает значимых усилий по удалению рекомендуемых объектов, контекст считается подтвержденным.

Если подобрать и подтвердить контекст не удастся, рекомендательная система работает в «*нейтральном контексте*» либо завершает сеанс.

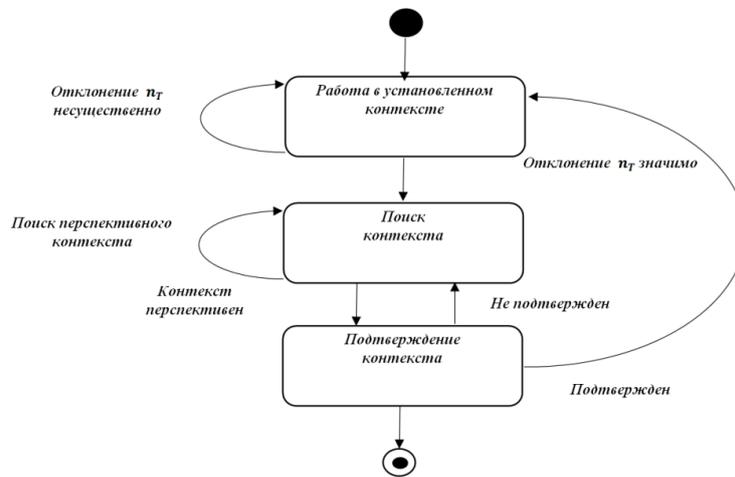


Рис. 1. Диаграмма состояний рекомендательной системы

Определение контекста. Контекст является информационным объектом, включающим в себя любую информацию для классификации наблюдаемой ситуации и принятия адекватных решений [22]. С контекстом связывается понятие смысла, важное для оценки полезности рекомендаций. Выбор контекста является проблемой, которую приходится решать в условиях неопределенности отображения смысла. Рациональным представляется строить выбор, используя следующий подход:

- ◆ выбор контекста осуществляется на основе опыта, представленного ранее выбиравшихся цепочек контекстов в сеансе пространственного анализа;
- ◆ логика выбора контекста использует оценку близости контекстов;
- ◆ мера близости моделирует смысловую близость контекстов;
- ◆ использование близких по смыслу контекстов гарантирует разумность рекомендаций.

Цепочка контекстов $\bar{c}_m = \langle \bar{c}_{m1}, \bar{c}_{m2}, \dots, \bar{c}_{mn} \rangle$, порожденная в сеансе пространственного анализа, является прецедентом опыта:

$$\bar{c}_m \in C^M, m = 1, 2 \dots M.$$

Цепочка контекстов имеет привязку к пространственной (L_S), временной (L_T) и семантической (L_C) области выполненного анализа. Используя эту область, можно задать одну из большого числа известных метрик близости $d(\bar{c}_a, \bar{c}_b)$ [23].

Используя идею, лежащую в основе case based reasoning (CBR) [24], близкие прецеденты следует считать перспективными для выработки рекомендаций. Учитывая многовариантность выбора подходящего контекста, представляется целесообразным использовать свойства цепочек контекстов, аналогичные свойствам временных рядов. Введем следующие свойства:

♦ тренд $\tilde{c}_m \subseteq \bar{c}_m$ как последовательность уникальных контекстов цепочки. Наличие тренда позволяет выбирать следующий контекст относительно текущего как наиболее перспективный. Разумность выбора следует из предположения, что близко расположенные пространственно-временные объекты близки по смыслу. Очевидно, что любая непустая цепочка контекстов имеет непустой тренд;

♦ тенденция $\tilde{c}_m \subseteq \tilde{c}_m$ как подпоследовательность тренда любой длины. Имея тенденцию, можно выбирать любой контекст, находящийся правее текущего. Разумность такой стратегии в том, что предполагаемое развитие процесса анализа через некоторое время приведет к выбранному контексту. Тенденция существует при $|\tilde{c}_m| > 1$;

♦ ритм $\bar{t}_m = \langle t_{m1}, t_{m2}, \dots, t_{mr} \rangle$ как последовательность временных интервалов между изменением контекста анализа. Ритм может быть определен для цепочки контекстов, ее тренда или тенденции. Выбор контекста на основе ритма разумен тем, что прогнозирует момент времени изменения смыслового направления анализа.

Чтобы выбрать контекст на текущем этапе пространственного анализа, необходимо следовать известному циклу CBR: для имеющейся цепочки контекстов выявить наиболее близкие, отобрать любой из них как перспективный соответственно описанным выше свойствам цепочек и применить данные контекста для формирования рекомендаций.

Экспериментальное исследование. Эффект применения предложенных в работе принципов работы recommender system может быть достоверно оценен в случае, когда система обладает адекватными знаниями. Эти знания представлены прецедентами анализа. Удовлетворенность рекомендациями можно оценить, по нашему мнению, только опросом пользователей. Такие методики известны [25]. Поэтому целью экспериментального исследования было поставлено получение оценки показателей ситуационной осведомленности (SA) и когнитивной нагрузки (CL) при заданном пространственном размещении цепочек контекстов, участвовавших в сеансе пространственного анализа.

С этой целью была создана тематическая карта пространственной области, которая изучалась без recommender system. На одном из слоев были картографированы экспертные оценки SA (рис. 2,a). На втором слое – оценки CL (рис. 2,b). Уровни SA и CL оценивались по 10-балльной шкале. Максимальная ситуационная осведомленность либо когнитивная нагрузка соответствовала значению 10. Оценки были усреднены, что позволило получить значения $m_{SA} = 4,2$ и $m_{CL} = 8,5$. Следовательно, пользователь мобильного приложения получит результат, субъективно соответствующий указанным уровням SA и CL

Для моделирования анализа с использованием рекомендаций было описано 5 прецедентов с 6 контекстами. Каждому прецеденту соответствовала область на карте с парой значений приращений уровней SA и CL (рис. 2,c). Слои SA и CL были обновлены с учетом приращений. Новые усредненные уровни SA и CL составили $m_{SA} = 7,1$ и $m_{CL} = 8,1$. Этот результат логичен, поскольку приобретение опыта потенциально способствует повышению полезности картографической информации.

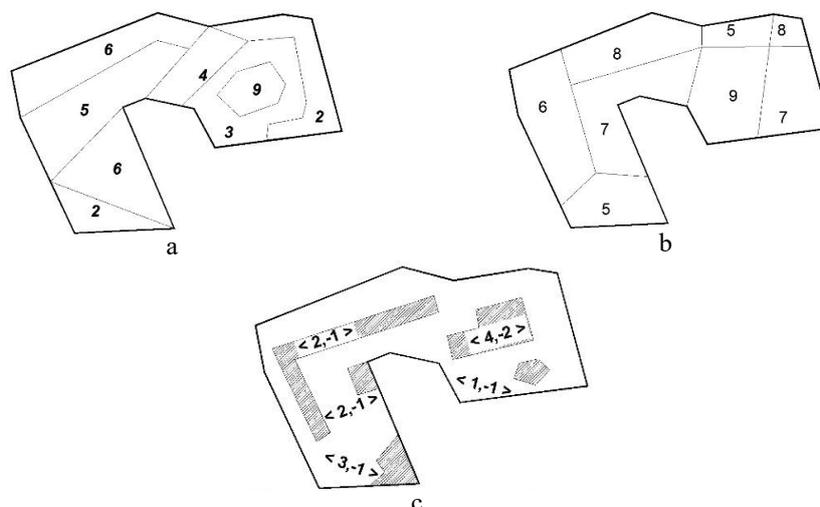


Рис. 2. Распределение уровней ситуационной осведомленности и когнитивной нагрузки

Далее моделировались 10 сеансов анализа, каждый из которых случайным образом располагался на карте. Каждая область анализа пересекалась с исходными областями и зонами прецедентов. Средние значения SA и CL для зон сеансов оказались равными $m_{SA} = 8,0$ и $m_{CL} = 6,5$. Таким образом, на модели SA возросла в 1.9 раза, уровень CL снизился в 1.3 раза. Полученные числовые данные для рассматриваемого случая дают конкретное представление о потенциальных возможностях повышения полезности пространственного анализа с использованием рекомендательной системы.

Заключение. Интеллектуальное управление процессом пространственного анализа при решении трудно формализуемых задач реализуется за счет специальных мер по выработке рекомендаций и смены контекстов. В данной работе предложены методы решения этих задач. Предложена концепция представления рекомендаций как составной части картографического изображения. Описана формальная модель конструирования рабочей области. Предложен принцип работы рекомендательной системы, который заключается в поиске контекста текущего диалога. Выбор контекста основан на знаниях о накопленном опыте пространственного анализа. Цепочки контекстов, представляющие опыт, предложено идентифицировать тремя параметрами – трендом, тенденцией и ритмом. Они используются при оценке близости прецедентов в ходе прецедентного анализа.

Экспериментальное исследование показало, что по мере накопления опыта проведения пространственного анализа рост ситуационной осведомленности способен опережать увеличение уровня когнитивной нагрузки пользователя-аналитика.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении поиска более эффективных моделей представления опыта и логики формирования рекомендаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логинов Н.И., Спиридонов В.Ф., Курбанов К.А. [и др.]. Устойчивые индивидуальные различия в предпочтениях ментального vs воплощенного режимов решения мыслительных задач // Когнитивная наука в Москве: новые исследования: Матер. конференции, Москва, 23–24 июня 2021 года / под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: БукиВеди, Институт практической психологии и психоанализа, 2021. – С. 255-260.

2. *Спирidonov В.Ф.* Психология мышления. Решение задач и проблем: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2019.
3. *Dr Michael J de Smith, Prof Michael F Goodchild, Prof Paul A Longley & Associates.* Geospatial Analysis A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools. – 6th ed., 2018, UK.
4. *Haifa Tamiminia, Bahram Salehi, Masoud Mahdianpari, Lindi Quackenbush, Sarina Adeli, Brian Brisco.* Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 164. – P. 152-170. – <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
5. *Haoxuan Wang, Yuna Ni, Ling Sun, Yuanyuan Chen, Ting Xu, Xiaohui Chen, Weihua Su, Zhiguang Zhou.* Hierarchical visualization of geographical areal data with spatial attribute association // *Visual Informatics.* – 2021. – Vol. 5, Issue 3. – P. 82-91. – <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2021.09.001>.
6. *Michael F. Goodchild.* Spatial Thinking and the GIS User Interface // *Procedia - Social and Behavioral Sciences.* – 2011. – Vol. 21. – P. 3-9. – <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.002>.
7. *Muhammad Nazrul Islam, Harry Bouwman.* Towards user-intuitive web interface sign design and evaluation: A semiotic framework // *International Journal of Human-Computer Studies.* – 2016. – Vol. 86. – P. 121-137. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2015.10.003>.
8. *Singh, Pradeep & Dutta Pramanik, Pijush & Dey, Avick & Choudhury, Prasenjit.* Recommender Systems: An Overview, Research Trends, and Future Directions // *International Journal of Business and Systems Research.* – 2021. – Vol. 15. – P. 14-52.
9. *Maria del Carmen Rodríguez-Hernández, Sergio Ilarri.* AI-based mobile context-aware recommender systems from an information management perspective: Progress and directions // *Knowledge-Based Systems.* – 2021. – Vol. 215. – 106740. – <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106740>.
10. *Shaina Raza, Chen Ding.* Progress in context-aware recommender systems – An overview // *Computer Science Review.* – 2019. – Vol. 31. – P. 84-97. – <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2019.01.001>.
11. *Jose Aguilar, Marxfhony Jerez, Tania Rodríguez.* CAMEOnto: Context awareness meta ontology modeling // *Applied Computing and Informatics.* – 2018. – Vol. 14. – P. 202-213.
12. *Saurabh Sharma, Harish Kumar Shaky, Venkatarri Marriboyina.* A location based novel recommender framework of user interest through data categorization // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – Vol. 47, Part 19. – P. 7155-7161. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.325>.
13. *Myung Jin Choi, Antonio Torralba, Alan S. Willsky.* Context models and out-of-context objects // *Pattern Recognition Letters.* – 2012. – Vol. 33. – P. 853-862.
14. *Geir Solskinnsbakk, Jon Atle Gulla.* Combining ontological profiles with context in information retrieval // *Data & Knowledge Engineering.* – 2010. – Vol. 69. – P. 251-260.
15. *Xuan Lv, Nora M. El-Gohary.* Enhanced context-based document relevance assessment and ranking for improved information retrieval to support environmental decision making // *Advanced Engineering Informatics.* – 2016. – Vol. 30. – P. 737-750.
16. *Moshe Unger, Ariel Bar, Bracha Shapira, Lior Rokach.* Towards latent context-aware recommendation systems // *Knowledge-Based Systems.* – 2016. – Vol. 104. – P. 165-178.
17. *Bin Xia, Zhen Ni, Tao Li, Qianmu Li, Qifeng Zhou.* VRer: Context-Based Venue Recommendation using embedded space ranking SVM in location-based social network // *Expert Systems With Applications.* – 2017. – Vol. 83. – P. 18-29.
18. *Cioara T., Anghel I., Salomie I., Dinsoreanu M., Copil G., Moldovan D.* A self-adapting algorithm for context aware systems // in: *Roedunet International Conference (RoEduNet), 2010 9th.* – 2010. – P. 374-379.
19. *Kwon O., Yoo K., & Suh E.* UbiDSS: A proactive intelligent decision support system as an expert system deploying ubiquitous computing technologies // *Expert Systems with Applications.* – 2005. – Vol. 28 (1). – P. 149-161.
20. *Quintana-Amate S., Bermell-Garcia P., Tiwari A., & Turner C.J.* A new knowledge sourcing framework for knowledge-based engineering: An aerospace industry case study // *Computers & Industrial Engineering.* – 2017. – Vol. 104. – P. 35-50.
21. *Ivens Portugal, Paulo Alencar, Donald Cowan.* The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review // *Expert Systems with Applications.* – 2018. – Vol. 97. – P. 205-227. – <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.020>.
22. *Zofie Cimburowa, Meta Berghauser Pont.* Location matters. A systematic review of spatial contextual factors mediating ecosystem services of urban trees // *Ecosystem Services.* – 2021. – Vol. 50. – P. 101296.

23. Feng Liang, Honglong Chen, Kai Lin, Junjian Li, Zhe Li, Huansheng Xue, Vladimir Shakhov, Hannan Bin Liaqat. Route recommendation based on temporal-spatial metric // *Computers & Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 97. – 107549. – <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107549>.
24. Yuan Guo, Bing Zhang, Sun Y., Jiang K., Wu K. Machine learning based feature selection and knowledge reasoning for CBR system under big data // *Pattern Recognition*. – 2021. – Vol. 112. – 107805. – <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107805>.
25. Hart S.G., Staveland L.E. Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research / Hancock P.A., Meshkati N. (Eds.), *Advances in psychology, Human mental workload*. – Vol. 52. – North-Holland, 1988. – P. 139-183. – 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.

REFERENCES

1. Loginov N.I., Spiridonov V.F., Kurbanov K.A. [i dr.]. Ustoychivye individual'nye razlichiya v predpochteniyakh mental'nogo vs voploshchennogo rezhimov resheniya myslitel'nykh zadach [Stable individual differences in preferences of mental vs embodied modes of solving mental tasks], *Kognitivnaya nauka v Moskve: novye issledovaniya: Mater. konferentsii, Moskva, 23–24 iyunya 2021 goda* [Cognitive Science in Moscow: New research: Conference Proceedings, Moscow, June 23-24, 2021], ed. by E.V. Pechenkoy, M.V. Falikman, A.Ya. Koymfan. Moscow: BukiVedi, Institut prakticheskoy psikhologii i psikhoanaliza, 2021, pp. 255-260.
2. Spiridonov V.F. Psikhologiya myshleniya. Reshenie zadach i problem: ucheb. posobie [Psychology of thinking. Solving problems and problems: a textbook]. 2nd ed. Moscow: Izd-vo Yurayt, 2019.
3. Dr Michael J de Smith, Prof Michael F Goodchild, Prof Paul A Longley & Associates. *Geospatial Analysis A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools*. – 6th ed., 2018, UK.
4. Haifa Tamiminia, Bahram Salehi, Masoud Mahdianpari, Lindi Quackenbush, Sarina Adeli, Brian Brisco. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 164, pp. 152-170. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
5. Haoxuan Wang, Yuna Ni, Ling Sun, Yuanyuan Chen, Ting Xu, Xiaohui Chen, Weihua Su, Zhiguang Zhou. Hierarchical visualization of geographical areal data with spatial attribute association, *Visual Informatics*, 2021, Vol. 5, Issue 3, pp. 82-91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2021.09.001>.
6. Michael F. Goodchild. Spatial Thinking and the GIS User Interface, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2011, Vol. 21, pp. 3-9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.002>.
7. Muhammad Nazrul Islam, Harry Bouwman. Towards user-intuitive web interface sign design and evaluation: A semiotic framework, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2016, Vol. 86, pp. 121-137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2015.10.003>.
8. Singh, Pradeep & Dutta Pramanik, Pijush & Dey, Avick & Choudhury, Prasenjit. Recommender Systems: An Overview, Research Trends, and Future Directions, *International Journal of Business and Systems Research*, 2021, Vol. 15, pp 14-52.
9. María del Carmen Rodríguez-Hernández, Sergio Ilarri. AI-based mobile context-aware recommender systems from an information management perspective: Progress and directions, *Knowledge-Based Systems*, 2021, Vol. 215, 106740. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2021.106740>.
10. Shaina Raza, Chen Ding. Progress in context-aware recommender systems – An overview, *Computer Science Review*, 2019, Vol. 31, pp. 84-97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2019.01.001>.
11. Jose Aguilar, Marxjhony Jerez, Tania Rodriguez. CAMEnto: Context awareness meta ontology modeling, *Applied Computing and Informatics*, 2018, Vol. 14, pp. 202-213.
12. Saurabh Sharma, Harish Kumar Shakya, Venkatadri Marriboyina. A location based novel recommender framework of user interest through data categorization, *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 47, Part 19, pp. 7155-7161. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.325>.
13. Myung Jin Choi, Antonio Torralba, Alan S. Willsky. Context models and out-of-context objects, *Pattern Recognition Letters*, 2012, Vol. 33, pp. 853-862.
14. Geir Solskinnsbakk, Jon Atle Gulla. Combining ontological profiles with context in information retrieval, *Data & Knowledge Engineering*, 2010, Vol. 69, pp. 251-260.
15. Xuan Lv, Nora M. El-Gohary. Enhanced context-based document relevance assessment and ranking for improved information retrieval to support environmental decision making, *Advanced Engineering Informatics*, 2016, Vol. 30, pp. 737-750.

16. Moshe Unger, Ariel Bar, Bracha Shapira, Lior Rokach. Towards latent context-aware recommendation systems, *Knowledge-Based Systems*, 2016, Vol. 104, pp. 165-178.
17. Bin Xia, Zhen Ni, Tao Li, Qianmu Li, Qifeng Zhou. VRer: Context-Based Venue Recommendation using embedded space ranking SVM in location-based social network, *Expert Systems With Applications*, 2017, Vol. 83, pp. 18-29.
18. Cioara T., Anghel I., Salomie I., Dinsoreanu M., Copil G., Moldovan D. A self-adapting algorithm for context aware systems, in: *Roedunet International Conference (RoEduNet), 2010 9th*, 2010, pp. 374-379.
19. Kwon O., Yoo K., & Suh E. UbiDSS: A proactive intelligent decision support system as an expert system deploying ubiquitous computing technologies, *Expert Systems with Applications*, 2005, Vol. 28 (1), pp. 149-161.
20. Quintana-Amate S., Bermell-Garcia P., Tiwari A., & Turner C.J. A new knowledge sourcing framework for knowledge-based engineering: An aerospace industry case study, *Computers & Industrial Engineering*, 2017, Vol. 104, pp. 35-50.
21. Ivens Portugal, Paulo Alencar, Donald Cowan. The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review, *Expert Systems with Applications*, 2018, Vol. 97, pp. 205-227. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.020>.
22. Zofie Cimburova, Meta Berghauser Pont. Location matters. A systematic review of spatial contextual factors mediating ecosystem services of urban trees, *Ecosystem Services*, 2021, Vol. 50, pp. 101296.
23. Feng Liang, Honglong Chen, Kai Lin, Junjian Li, Zhe Li, Huansheng Xue, Vladimir Shakhov, Hannan Bin Liaqat. Route recommendation based on temporal-spatial metric, *Computers & Electrical Engineering*, 2022, Vol. 97, 107549. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107549>.
24. Yuan Guo, Bing Zhang, Sun Y., Jiang K., Wu K. Machine learning based feature selection and knowledge reasoning for CBR system under big data, *Pattern Recognition*, 2021, Vol. 112, 107805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107805>.
25. Hart S.G., Staveland L.E. Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research / Hancock P.A., Meshkati N. (Eds.), *Advances in psychology, Human mental workload*, Vol. 52. North-Holland, 1988, pp. 139-183. 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.

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; тел.: 88634371695; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb@yandex.ru; 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.

Bozhenyuk Alexander Vitalyevich – e-mail: avb@yandex.ru; 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.

С.С. Датвасе, Р.Р. Дешмукх, Р.С. Гупта

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТУПНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОТПЕЧАТКОВ ЛАДОНИ: ОБЗОР

Отпечаток ладони является уникальным и очень полезным биометрическим признаком. За последние несколько десятилетий по этой теме было проведено достаточно исследований. Разработаны и успешно реализованы различные алгоритмы и системы. Так как данный метод не позволяет получить более расширенную информацию для распознавания личности, мультиспектральные или гиперспектральные изображения и распознавание отпечатков ладоней могут стать потенциальным ответом на эти системы. Биометрические технологии широко используются в сфере безопасности для аутентификации и идентификации в течение последних нескольких лет. Для повышения точности и скорости требуется улучшенная система распознавания. В этой статье рассматриваются некоторые современные базы данных отпечатков ладоней, а также описаны используемые методы и их точность. Лицо, отпечаток пальца, радужка глаза, отпечаток ладони, руки являются физиологическими биометрическими данными. Из всех биометрических, физиологическая биометрия предлагает больше всего преимуществ. База данных бесконтактных изображений ладоней PolyU-IITD составлена с помощью ручной камеры, включает жителей Индии и Китая. База данных бесконтактных отпечатков ладоней IIT Touchless Palmprint получена от студентов и преподавателей Delhi India, база состоит из полных изображений рук. База данных гиперспектральных отпечатков ладоней создана Гонконгским политехническим университетом, была собрана в отделе биометрической исследовательской лаборатории с помощью жидкокристаллических фильтров Meadowlark. Многоспектральная база данных отпечатков пальцев, гиперспектральная база данных были составлены китайскими исследовательскими группами учёных. База данных отпечатков пальцев polyU собрана у 193 человек, содержит 386 ладоней. Китайская академия наук разработала базу данных отпечатков ладоней CASIA с помощью собственного устройства распознавания отпечатков ладоней. База данных отпечатков пальцев XJTU собирается с помощью гаджетов iPhone 6S, HUAWEI mate8, LG G4, Samsung Galaxy Note5 и M18. Также представлен литературный обзор современных исследований в данной области. Отмечены преимущества гиперспектральных изображений по сравнению с мультиспектральными изображениями, гиперспектральные изображения отпечатков ладоней очень трудно подделать.

Биометрический; отпечаток ладони; база данных; гиперспектральный; мультиспектральный.

S.S. Datwase, R.R. Deshmukh, R.S. Gupta

MODERN AVAILABLE PALMPRINT DATABASES: A REVIEW

The palm print is a unique and very useful biometric. A lot of research has been done on this topic over the past few decades. Various algorithms and systems have been developed and successfully implemented. Since this method does not provide more advanced information for personality recognition, multispectral or hyperspectral imaging and handprint recognition could be a potential answer to these systems. Biometric technologies have been widely used in the security industry for authentication and identification over the past few years. An improved recognition system is required to improve accuracy and speed. This article reviews some modern handprint databases and describes the methods used and their accuracy. Face, fingerprint, iris, palm print, hands are physiological biometric data. Of all biometrics, physiological biometrics offers the most benefits. The PolyU-IITD non-contact palm image database compiled with a handheld camera includes residents of India and China. The database of IIT Touchless Palmprints is sourced from Delhi India students and teachers and consists of complete hand images. The database of hyperspectral fingerprints created by the Hong Kong Polytechnic University was collected in the

Biometric Research Laboratory Department using Meadowlark liquid crystal filters. The Multispectral Fingerprint Database, Hyperspectral Database was compiled by Chinese research teams of scientists. The polyU fingerprint database was collected from 193 people and contains 386 palms. The Chinese Academy of Sciences has developed the CASIA handprint database with its own handprint recognition device. The XJTU fingerprint database is collected using iPhone 6S, HUAWEI mate8, LG G4, Samsung Galaxy Note5 and MI8 gadgets. A literature review of current research in this area is also presented. The advantages of hyperspectral images compared to multispectral images are noted, hyperspectral images of palm prints are very difficult to fake.

Biometric; palmprint; database; hyperspectral; multispectral.

Introduction. In today's generation, there is a rapid and widespread adoption of technology and devices such as mobile phones and the Internet, where some personal data of the user is stored and protected by passwords and patterns that are easily cracked, and where biological features can be used for all security and privacy concerns. Biometric technology has been increasingly used in security to produce authentication and identification during the last few years. Physiological and behavioural biometrics are the two forms of biometrics [1]. Face, fingerprint, iris, palmprint, hand etc. are physiological biometrics; behavioural biometrics include gait, keystroke, and signature. All the biometrics, physiological biometrics offer the most advantages [2]. Identification and verification are the two most common recognition modes for biometrics systems. The term "identification" refers to a one-to-many comparison that answers the query, "Who is this person?" Verification is a one-to-one comparison that answers the question "is the person who claims to be who he says he is?" Palmprint recognition has gotten a lot of interest from researchers as one of the new biometrics techniques [3]. There are various biometric qualities, each with its own set of characteristics. Palmprint has a big area to get more features, the palm print is more reliable, and the palm print may be used with images of poor quality [4] [5]. Palm-related features, as well as major features like ridges, valleys, and minutiae point primary lines, exhibit great accuracy in all biometric features. Where the palmprint has a large ROI, it can be taken at a lesser resolution and from a larger distance with a less costly sensor or DSLR camera, making it less expensive [6]. Palmprint have low distortion, good stability, and high uniqueness when compared to other biometrics. Previously, classic natural light imaging systems could only gather palmprint images in grayscale forms. Hyperspectral and multispectral palmprint imaging are novel approaches that have recently been applied to improve the performance and accuracy of classic natural light imaging systems. The palmprint technique may record the palm in a range of spectrums, ranging from 3 to 10, with the most common being red, green, blue, and near-infrared (NIR) spectral bands. As a result, each spectral band highlights various aspects in comparison to the natural light image, allowing for more information to be obtained in order to improve a palmprint identification system [7].

Several internet palmprint databases are available, according to the research. Which the researcher collects according to their research requirements, with varying illumination, size, and pixels Contactless contact based devices with various age groups were used to acquire some information.

Database Review

1) PolyU-IITD Contactless Palmprint Images Database (Version 3.0)

PolyU-IITD Contactless Palmprint Images Database is acquired from people of India and china from the various locations with help of hand-held camera. This database is acquired from 600 different subjects which is the largest until August 2020 literature. The database is collected from the age group of 5 to 72 years from different population group that includes non-officer works, farmers, countryside laborers, injured palms and hands with special capabilities or injuries. The database provides each 10 images of left and right hand it means 20 images of each person. The images in this database have high

scale variations. This database contains fingerprint images taken over 15 years and is one of the unique contributions of this database. This database is available to researchers from December 2018 [8].

2) IIT Delhi Touchless Palmprint Database (Version 1.0)

The IIT Touchless Palmprint Database is acquired from the students and the teachers of IIT Delhi India the database consist of full hand images. The database collected in the year of July 2006 to June 2007 by using simple and touchless imaging setup. The database acquired in the indoor climate and enroll circular fluorescent illumination on all side of the camera lens. The all the images are in bitmap format (*.bmp) collected from 230 peoples from the age group of 12 to 57 years old the resolution of each image is 800 x 600 pixels. Seven images are taken of each left and right hand from different position. The all images have sequentially numbered in integer number. This database is available to the researcher from October 2007 [9].

3) Hyperspectral Palmprint Database

In the Hong kong polytechnic university the big hyperspectral palmprint database was collected in their department of biometric research lab with the help of liquid crystal tunable filter system which is made by meadowlark some charge couple device was used made by cooke corporation with help of Osram halogen light of 500 W. The central wavelength is 550 nm. The palm image is taken at 69 spectral band at length of 10 nm with spectral at 420-1100 nm. The database collected from 190 individual in between the age group of 20 to 60 year old. The database is collected in two session with average time gap at 1 month. The seven image is taken of each left and right palm of each person so total database contain 5240 images. The first ten and last ten spectra are removed because of low quality. The size of each image is 128*128 Pixel [10, 11, 12].

4) Multispectral palmprint Database

Zhang et. al., [13] they developed the multispectral palmprint database from the 250 different people in that 195 males are included. The database is collected with the help of data acquisition device which is the touchless palmprint device. The database is collected from 20 to 60 years old. The data is collected in two different session with time interval of 9 days. On each collection session the six samples of each palm is taken. From the total 500 different palm total 6000 images are collected in the database. Each time device collected the four different band (Red, Green, Blue, NIR) it means four images each time in 1 sec. The resolution of each image is 352*288 pixel.

5) Hyperspectral database

Zhao et. al., [14, 15] developed their own huge database of hyperspectral imaging device in visible light and NIR in the University of Macau, china. There is 209 subjects are taken to establish a dataset. In the spectral device the light source covers a spectral wavelength from 520 nm to 1040 nm with 10 nm intervals so total 53 spectral bands are used. The size of each image captured is 501*501 at 96 dpi. This images are stored in bitmap (*.bmp) with 8 bit per pixel format. And five samples were collected from the each palm it means total 55,385 image dataset is collected.

6) The polyU palmprint Database (version 2)

The polyU palmprint database is collected from the 193 people from the total 386 palm. The Samples were collected in the two sessions. The average time between two sessions is two months. In each session 10 samples are collected from each hand but in the second session not all 10 samples are collected from each palm only few samples are captured. In this database total 7752 palmprint images were captured and large dataset is collected. Where in the second session only few samples were collected for evaluation of that total collected database, they choose 3740 image sample of 187 subjects in that each individual person give 10 sample at each right and left palm [16].

7) CASIA polyU palmprint

The Chinese academy of science developed the palmprint database with their self-developed palmprint recognition device. In the database the images were captured using the CMOS camera which is mounted on the top. In this device person have to just insert palm into the device and place it on to a uniform-coloured background. The database is developed from the 312 people with 16 samples from both right and left hand. Contain total 5502 palmprint images. All the images are 8-bit grey level in the JPEG format [17, 18].

8) COEP

The COEP devolved the palmprint database in the project funded by the Rajiv Gandhi Science and Technology commission. The database consists of total 1344 images collected from the 168 people. The images are captured using digital camera 8 samples at each subject. The resolution of the images is 1600*1200. The database collected in period of 1 year. The images are available in .jpg format [19].

9) XJTU palmprint database

The XJTU palmprint database is captured in an unrestricted environment. XJTU database is collected from iPhone 6S, HUAWEI mate8, LG G4, Samsung Galaxy Note5 and MI8. The database is collected in two environments with natural indoor light and flashing light from mobile phones. From 100 people in the age group of 19 to 35 years, the samples of each person give 10 to 15 samples of the left and right hands in different environments. The poses and background of the picture are always changing. The pixel size and image size of each mobile phone is different. A total of 20,000 images are captured. (100*2*10*5*2) [20].

Literature Review. Shashi Balaa, et. al., [21] the proposed method of palm print detection is strengthened applied on CASIA database in this study by the use of the Maximum Curvature approach and the Repeated Line Tracking method to identify broken and repeated lines. In this method, CLAHE is used to improve contrast, and a thresholding scheme is used to apply segmentation. The approach also employs a Log Gabor filter to effectively remove noise. The technique employs the greatest curvature method, which is quite useful for obtaining fine information from the palm. The method of repeated line tracking has a faster response time. In this procedure, a 100 percent matching score is achieved.

Mustafa s. Kadhmi et. al., [17] they proposed methods for extracting characteristics and classifying them based on direction, Local Binary Pattern (LBP) features, C5.0, and K-Nearest Neighbour (KNN). The system used two palmprint image datasets from the College of Engineering Pune (COEP) and the Chinese Academy of Sciences (CASIA) and achieved a high recognition rate of 99.7% with a low error rate of 0.009%.

Zohaib Khan, et. al., [22] Contour Code, a unique multidirectional representation and binary hash table encoding for robust and efficient multispectral palmprint detection, was introduced in this study. For the extraction of a region of interest from palm images collected using noncontact sensors, an automatic technique was developed. They report quantitative ROI extraction findings by comparing automatically derived ROIs to humanly extracted ground truth, unlike existing approaches. In numerous experimental configurations employing two standard databases, PolyU and CASIA, the Contour Code consistently outperformed existing state-of-the-art procedures and consistently outperformed existing state-of-the-art techniques. The Contour Code's binary encoding in a hash table allows for simultaneous database matching and score level fusion of the multispectral bands in a single step. Score normalization is not required before fusion, unlike other methods. The Contour Code is a generic orientation code for line-like features that can be applied to fingerprints and finger-knuckle prints, among other biometric attributes. On both datasets, the error rates produced by their technique 0.003 percent on PolyU and 0.2 percent on CASIA are the lowest in the literature.

Hui Li et. al., [23] in the three stages of palmprint recognition in this paper, four different quantum algorithms are used. In palmprint filtering processing, the quantum adaptive median filtering algorithm is introduced first. Through comparison, the quantum filtering algorithm can achieve a superior filtering result than the classical algorithm. Due to quantum parallelism, the quantum Fourier transform (QFT) is then employed to extract pattern features with only one operation. In the feature extraction, the suggested technique outperforms the discrete Fourier transform by an exponential factor. Finally, palmprint matching employs quantum set operations and the Grover method. The quantum approach only needs to use square of N operations to discover the target palmprint, according to the experimental results, whereas the regular method requires N times of calculation. At the same time, the quantum algorithm's matching accuracy is nearly 100 percent. Experimental results show that the quantum algorithm only needs to do square of N operations to discover the target palmprint, whereas the classical method requires N times of calculation. At the same time, the quantum algorithm's matching accuracy is nearly 100%.

Junwen Sun et. al., [24] in this study, a band selection strategy on PolyU hyperspectral palmprint database is proposed. Low-quality bands are eliminated directly using picture entropy and the EER metric. After that, a clustering method is utilized to choose the best band combination, and the clustering method is finally validated by the band fusion method. The EER on the proposed approach is EER 0.17325%. Furthermore, in this study they told the biometrics system should have an only a high recognition rate as well as be resistant to spoof assaults. Hyperspectral images can provide a lot of information about a real human hand, rather than a printed palmprint paper or a rubber hand.

Akila P, et. al., [16] the left and right palmprint samples of the identical subject are shown to be substantially comparable in this paper. They proposed the methods on two databases Poly U (version 2) and IITD palmprint database. This research investigates the usage of this type of similarity for palmprint identification performance improvement. The proposed method thoroughly considers the characteristics of the left and right palmprint before designing an algorithm to compare their similarity. Furthermore, the suggested weighted fusion approach use this Similarity to merge the three types of scores derived from the left and right palmprint pictures. Extensive tests show that the proposed framework achieves very high accuracy, and that using the similarity score between the left and right palmprints improves accuracy significantly. The result of proposed method on polyU database is 0.06% to 0.2% which is less than conventional fusion method.

Wei Nie, et. al., [15] in this work by modifying image acutance, this research proposes a method for improving hyperspectral hand recognition. For the first time, a thresholded pixel-wise acutance value (TPAV) was developed for analyzing image acutance. Then, using Gaussian filters, image convolution was used to modify the picture acutance, which served as a pre-processing step for discriminative local feature extraction. Finally, using TPAV, the ideal acutance range for each band in a hyperspectral hand database may be calculated. Experiments on HDHV and HPV databases were carried very extensively. The findings backed up the theory that there is an optimal acutance range for hyperspectral hand biometrics to work at their best. The PolyU multispectral palmprint database was used to test the generalization capabilities of their method and supported the hypothesis. Even though acutance correction takes on average 0.0229 seconds for a single image from the three datasets the end result is much better than the original with no acutance adjustment.

Jinyu Guo, et. al., [25] they present a unique palmprint identification on the polyU (version 1) palmprint database they approach that combines phase congruency (PC) with two-dimensional principal component analysis (2DPCA) in this study. Extensive tests

have been carried out to assess the algorithm's performance. They demonstrate that the phase congruency image can eliminate the effects of lighting conditions. Simultaneously, increase the recognition validity using 2DPCA, which does not damage the image structure. When the dimension is set to 46, the proposed technique gets a recognition rate of 99.44 percent matching time is 0.311s. The performance of the PCA, 2DPCA, MPCA, ICA, MICA, and LPP techniques is much superior. The fusion scheme, on the other hand, places a significant computational burden on the system.

Sen Lin, et. al., [26] they suggested a palmprint recognition method based on block mean gray values in this work, which they dubbed the non-contact palmprint identification simulation system. The simulation system described in this article provides a number of advantages over previous approaches, including ease of image acquisition, ease of operation, and high speed of operation. To test the method, they created their own non-contact palmprint database which contain 100 right palm with 10 samples each in that 5 samples for registration 5 for test. The results of the experiments reveal that this technology can achieve a decent palmprint recognition effect, and that it is simple, feasible, and successful, with a wide range of applications. This experiment has a 97.48 percent recognition rate.

Shuping Zhao et al. [14] they introduced a multiple features fusion representation approach for hyperspectral palmprint recognition at the score level in this paper. In that they create their own hyperspectral dataset of 55,385 images. In the first phase, they used LBP, LDP, and DCNN to extract features from hyperspectral palmprint images from a single person using all bands, resulting in three feature matrices comprising local texture features, local direction features, and global deep convolutional features, respectively. The 2D-PCA was then used to reduce the dimensionality of the feature matrices and generate a uniform feature vector. Finally, they suggested that collaborative residual feature fusion be used in recognition. The feature matrix's dimensionality was lowered with this new format. Then, using a dataset of 53 spectral bands, recognition experiments were carried out. When compared to feature combinations, the suggested feature representation approach had the best results, with an EER of 0.11 percent and an accuracy of 99.76 percent.

Anita G. Khandizod et. al., [27] in this paper, 13 image enhancement techniques were used to improve the quality of a hyperspectral palmprint image. These methods applied on PolyU Hyperspectral palmprint database. To determine the quality, subjective and objective image quality measures were used. Because subjective analysis can't be relied on because it varies from person to person based on their image perception and visual assessments, as well as being time consuming, the enhanced image was subjected to objective quality measures such as MSE and PSNR. According to their findings, the 2D median filter is the best image enhancing strategy for hyperspectral palmprint images when compared to the other techniques.

Anita Gautam Khandizod et. al., [12] in this research, palmprint line features are recovered using the phase congruency approach on a total of 600 palmprint images, and limited adaptive histogram equalization (CLAHE) is utilized to increase image quality and contrast. The phase congruency feature vector is compared to other database feature vectors using a k-NN classifier, and the system determines how many people are admitted and denied. The experimental results reveal that as the database recognition accuracy improved, so did the database recognition accuracy. The proposed method obtains a recognition accuracy of 95.31 percent.

Ajay Kumar et. al., [28] in this study, they looked at how to improve performance by combining numerous palmprint matchers at the rank level. They looked at rank level combination for palmprint matchers utilizing four distinct ways, including Borda count, weighted Borda count, highest and product of ranks, and Bucklin majority voting, as

well as proposing a new nonlinear approach for combining the ranks. The experimental results are shown on two palmprint databases, from 234 and 100 participants palmprint image databases, and they consistently show that rank level combination can be used to increase performance from a combination of matchers. Second, as demonstrated by the experimental result of 98.75%, their suggested nonlinear rank level fusion approach consistently outperforms existing popular rank level fusion approaches.

Xingpeng Xu et. al., [29] to the best of their knowledge, a quaternion model is used for multispectral biometrics for the first time in this study to completely exploit the information in multispectral palmprint images. QPCA is designed to represent global features, while QDWT is intended to extract local characteristics. For 500 palms, their fusion could obtain a recognition accuracy of 98.83 percent. The experimental results suggest that the proposed method is suitable for real-world applications, and that the quaternion model is a useful and efficient multispectral biometric tool. In the case of less than four illuminations, the quaternion matrix has been demonstrated to be still effective for multispectral palm print.

Huikai Shao et. al., [20] they undertake a thorough investigation for efficient deep palmprint identification using distilled hashing coding in this paper. Using five mobile phones, they created an unconstrained palmprint image database. This database has more palmprint photos and modalities with less acquisition constraints than comparable public databases. Each image has 14 important locations specifically annotated for ROI extraction, which will be made public to the scientific community. They were able to identify important spots and generate relatively consistent ROIs using the regression tree approach. They achieved efficient palmprint verification and identification using a deep hashing network, with an average accuracy of 97.49 percent and an average EER of 0.607 percent. On light networks, the knowledge distillation technique is utilized to improve recognition performance. The average classification accuracy has increased by 40.61 percent, while the average EER has decreased by 1.64 percent, according to the findings. The results of the experiments suggest that the database they created has a number of advantages and may be utilized successfully in the research of a variety of tasks.

Dexing Zhong et. al., [30] in this study, they proposed a palmprint recognition method based on a Siamese network that can calculate the similarity index of two input palmprints directly. Their technology also included end-to-end recognition. Two parameter-sharing VGG-16 networks were used to extract the convolutional characteristics of two input palmprints, with the top network identifying the similarity of two input palmprint based on their convolutional features. This method had an EER of 0.2819 percent on the PolyU test set. In addition, using their realistic dataset XJTU, the EER was 4.559 percent.

Midhuna Naveen et. al., [31] in this study, they concentrated on palmprint identification utilizing deep learning methodology; deep learning is the most powerful technology, and RFCNN has effectively applied it to biometric and computer vision problems. The palmprint recognition system based on RFCNN offers a high level of accuracy when compared to existing identification systems and is expected to bring in a new age in biometric identification technologies. When compared to other CNN algorithms, RFCN has the highest accuracy of 98.36%. Alex Net has a 98.21 percent accuracy, 92.56 percent LBP, and 89.50 percent SVM. The accuracy of SVM is the lowest. The accuracy rate is increased by combining CNN-based algorithms. The greater the accuracy and test data rate, the larger the dataset utilized to train the model.

Xueqiu Dong et. al., [32] they propose a palmprint recognition algorithm based on Convolutional Neural Networks (CNN), a palmprint recognition method that can directly act on grayscale images, the proposed approach is applied on the palmprint database of

Hong Kong University of science and technology the ability to learn palmprint database and get palmprint features using network automatic feature extraction, and the network can adapt to the diversity of palmprint through the design of training data. The palmprint feature can be recovered from the palmprint original without image pre-processing or other special extraction through effective network and training data design, resulting in effective identification. The results of the experiments reveal that the method is effective and trustworthy in recognizing palmprint, with an accuracy of 99.95 percent.

Abdallah Meraoumia et. al., [33] proposed the design and development of multiple multimodal biometric systems for person identification that make use of features retrieved from a variety of palmprint image representations. They employed two methods for feature extraction: the method of feature extraction vector and the method of features model. The trial findings on a database of 400 users reveal that the identification accuracy is very high. They employ multiple common databases from PolyU to evaluate the proposed systems' identification accuracy. The databases include palm pictures with various representations, PLP, PVP, CLP, MSP, and 3DP. They employed their approach to generate a fused matching score that was used in the recognition step. The ROR for the hybrid system was 100%.

Anita G. Khandizod et. al., [34] in this paper, they used the Polytechnique Hong Kong University database of multispectral palmprint images, which has 6000 samples with four distinct illuminations, for a total of 24000 images. However, they only used two samples from each session, total 800 images. In that study, they first proposed database pre-processing, in which the Gaussian filter provided the best results, and then they did image fusion of all four illuminations using the DWT technique to decrease the large dimensionality 2nd order derivative. The Euclidian distance of two image was then determined. When the threshold value is 0.33 percent, it yields a recognition rate of 90%.

Poonam Pooniaa, et. al., [35] in this paper, they proposed a new palmprint template based on three standard databases and a multispectral palmprint database. They performed Delaunay triangulation on that database, which is mathematically proven to produce a robust local distribution, and the proposed template uses the minutiae transform algorithm to generate minutiae triplets. After that, the proposed template is resistant to the reconstruction procedure, and it is rotation, translation, and distortion invariant throughout. The recognition rate on the CRR and EER is 95.4 percent and 0.37 percent, respectively. PolyU has a 0.39 percent recognition rate while IIT Delhi has a 0.4 percent recognition rate.

In this survey of all research papers various feature extraction and classification methods on the palmprint database were used. Maximum curvature, repeated line tracking, KNN (K-Nearest Neighbour), Quantum algorithm, Deep convolution neural network, CLAHE, Contour Code, quantum Fourier transform (QFT): this method was shown to be the most accurate and fastest. Resistance against spoof assault is just as vital as accuracy and quickness. There are two types of imaging that achieved the best results in the research survey: hyperspectral and multispectral images. While multispectral images can be readily spoof, hyperspectral images are very difficult to spoof.

Hyperspectral Image. Hyperspectral imaging is another name for imaging spectroscopy [36]. Instead of assigning main colours (red, green, and blue) to each pixel, hyperspectral imaging analyses a wide spectrum of light [37]. In the wavelength range of 500 to 2500 nm, hyperspectral sensors acquire more than 100 contiguous spectral bands with a narrow bandwidth (5–10 nm) [38]. Hyperspectral sensors are designed to collect data from the reflecting region of the electromagnetic spectrum. The entire inspection spectrum is organized into hundreds of discrete contiguous bands and runs from visible to near infrared. Hyperspectral imaging is a popular remote sensing technique [39]. Hyperspectral images gather more spectral information, reducing processing time and

speeding up the process. Hyperspectral bands have a 0.01m gap between them. Data for hyperspectral imaging is collected in three dimensions: two spatial and one spectral [40]. The resulting hyperspectral images not only contain a lot of spectral information about the ground features' unique physical attributes, but they also have a lot of spatial information about them. As a result, Hyperspectral can be used to tackle problems that are difficult to answer in multispectral or natural photos, such as pixel identification [41].

Multispectral Image. Multispectral images are becoming increasingly common in research domains such as remote sensing, fluorescence microscopy, astronomical imaging, and geo-tracking [42]. A multispectral image is grey scale image. A grayscale image has one wavelength or colour channel, a Red–Green–Blue image has three wavelengths for each pixel, and CYMK has four colour channels. Multispectral imaging has between four and twenty colour channels [43]. Image data is captured via multispectral imaging in specified wavelength ranges across the electromagnetic spectrum. The wavelengths can be separated using filters or detected using devices that are sensitive to certain wavelengths, such as light from outside the visible light spectrum, such as infrared and ultra-violet light. Spectral imaging can extract information that the human eye's visible receptors for red, green, and blue are unable to acquire [44]. Using multispectral illuminators based on electromagnetic theory, multispectral images are produced. In order to make a better choice, multispectral approaches necessitate many samples of the same item. Multispectral images avoid the RGB image's metamerism problem while also providing more information than just colour and increasing colour accuracy. It makes use of a variety of electromagnetic spectrums in the visual range. 460nm, 630nm, 700nm, 850nm, 940nm, and white light are the wavelengths of the illuminator that correspond to the six spectrums [45].

Conclusion. The Biometric based on palmprint identification has improved day by day. In this paper we reviewed the palmprint available databases. We have studied the database how it was created with which devices and in which environment, database size, format and type, the database was created with contact based or contact-less device. In all the study we have reviewed the methods and different techniques applied on the available database and their recognition rate and speed. There are two types of imaging that achieved the best results in the research survey: hyperspectral and multispectral images. While multispectral images can be readily spoof, hyperspectral images are very difficult to spoof.

Acknowledgment. This work is supported by Department of Science and Technology under the Funds for Infrastructure under Science and Technology (DST-FIST) with sanction no. SR/FST/ETI-340/2013 to Department of Computer Science and Information Technology, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Aurangabad, Maharashtra, India. The authors would like to thank Department and University Authorities for providing the infrastructure and necessary support for carryout the research. The authors would like to thank Chhatrapati Shahu Maharaj Research Training & Human Development Institute (SARTHI) for the financial support in this work.

REFERENCES

1. *Khandizod A.G., Deshmukh R.R.* Multispectral Palm print Image Fusion-A Review, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN, 2014, pp. 37-45.
2. *Gautam K.A., Abbasov I.B., Namrta M.C.* Development of non-imaging palmprint spectral library via asd field spec4 spectroradiometer, *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2019, No. 3 (205), pp. 62-71.
3. *Shao H., Zhong D., Du X.* Towards efficient unconstrained palmprint recognition via deep distillation hashing. *arXiv preprint arXiv:2004.03303*. 2020 Apr 7.
4. *Nirmal Joshua R., 2Mr.C.Nelson kenedy babu.* Palm Print Recognition Using Artificial Neural Networks, 2020, Vol. 7, Issue14. ISSN- 2394-5125.

5. Prasanna, Yerra Satya Dhana Lakshmi, and R. Mani Deepika. Palm Print Recognition Using Inner Finger Deep Learning Using Neural Network, *International Journal*, 2020, 5.12.
6. Brown D., Bradshaw K. Deep Palmprint Recognition with Alignment and Augmentation of Limited Training Samples, *SN Computer Science*, 2022 Jan, 3 (1), pp. 1-7.
7. Gumaiei A., Sammouda R., Al-Salman A.M., Alsanad A. An effective palmprint recognition approach for visible and multispectral sensor images, *Sensors*. 2018 May, 18 (5), pp. 1575.
8. Available at: <https://www4.comp.polyu.edu.hk/~csajaykr/palmprint3.htm>.
9. Available at: http://www4.comp.polyu.edu.hk/~csajaykr/IITD/Database_Palm.htm.
10. Department of Computing, the Hong Kong Polytechnic University (PolyU), Hyperspectral Palmprint database, PolyU, accessed on Aug. 22, 2013. Available at: http://www4.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/Hyperspectral_Palmprint/HSP.htm. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
11. Zhang D., Guo Z., Gong Y. Feature Band Selection for Online Multispectral Palmprint Recognition, In *Multispectral Biometrics*, Springer, Cham, 2016, pp. 153-162.
12. Khandizod, Anita & Deshmukh, Ratnadeep. Hyperspectral Palmprint Recognition System using Phase Congruency and KNN Classifier, 2018.
13. Zhang D., Guo Z., Lu G., Zhang L, Zuo W. An online system of multispectral palmprint verification, *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2009 Oct 16,59 (2), pp. 480-90.
14. Zhao S., Nie W., Zhang B. Multi-feature fusion using collaborative residual for hyperspectral palmprint recognition, In *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC) 2018 Dec 7*, pp. 1402-1406. IEEE.
15. Nie W., Zhang B., Zhao S. Discriminative local feature for hyperspectral hand biometrics by adjusting image acutance, *Applied Sciences*, 2019 Jan;9(19), pp. 41-58.
16. Akila P., Gayathri R., Meenatchi R., Ramya M., Dharini D. Analysis of Multibiometric Palmprint Recognition System for Authentication, *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) NCICCT – 2016*, 2016, Vol. 4, Issue 19.
17. Kadhm M.S., Ayad H., Mohammed M.J. Palmprint Recognition System Based On Proposed Features Extraction And (C5. 0) Decision Tree, K-Nearest Neighbour (Knn) Classification Approaches, *J. Eng. Sci. Technol.*, 2021 Feb;16(1), pp. 816-31.
18. Available at: <http://biometrics.idealtest.org/dbDetailForUser.do?id=5> CASIA Palmprint Database (accessed: 29 May 2020).
19. Available at: <https://www.coep.org.in/resources/coeppalmprintdatabase>.
20. Shao H., Zhong D., Du X. Efficient deep palmprint recognition via distilled hashing coding, In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2019, pp. 0-0.
21. Bala S. Comparative analysis of palm print recognition system with Repeated Line Tracking method, *Procedia Computer Science*, 2016 Jan 1;92, pp. 578-82.
22. Khan Z., Shafait F., Hu Y., Mian A. Multispectral palmprint encoding and recognition. arXiv preprint arXiv:1402.2941. 2014 Feb 6.
23. Li H, Zhang Z. Research on palmprint identification method based on quantum algorithms, *The Scientific World Journal*, 2014 Jan 1;2014.
24. Sun J., Abdulla W., Wang W., Wang Q., Zhang H. Band Selection for Palmprint Recognition, *Journal of Advances in Information Technology*, Vol. 2016 Nov. 7(4), pp. 91-98.
25. Guo J., Liu Y., Yuan W. Palmprint recognition based on phase congruency and two-dimensional principal component analysis, In *2011 4th International Congress on Image and Signal Processing 2011 Oct 15*, Vol. 3, pp. 1527-1530. IEEE.
26. Lin S., Bai Y., Tang Y. Design of online non-contact palmprint recognition simulation system., In *2016 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI) 2016 Oct 15*, pp. 686-690. IEEE.
27. Khandizod A.G., Deshmukh R.R. Comparative analysis of image enhancement technique for hyperspectral palmprint images, *International Journal of Computer Applications*, 2015 Jul; 121(23), pp. 30-55.
28. Kumar A., Shekhar S. Palmprint recognition using rank level fusion, In *2010 IEEE International Conference on Image Processing 2010 Sep 26*, pp. 3121-3124. IEEE.
29. Xu X., Guo Z., Song C., Li Y. Multispectral palmprint recognition using a quaternion matrix, *Sensors*, 2012 Apr;12 (4), pp. 4633-47.
30. Zhong D., Yang Y., Du X. Palmprint recognition using siamese network, In *Chinese conference on biometric recognition, 2018 Aug 11*, pp. 48-55. Springer, Cham.

31. *Midhuna Naveen, Neethumol K J, Pritty Mary Mathew, Sherin Joseph, Sujitha M.*, Machine Learning Algorithms based Palmprint Biometric Identification, *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) ICCIDT – 2021*, Vol. 09, Issue 07.
32. *Dong X., Mei L., Zhang J.* Palmprint recognition based on deep convolutional neural networks, *In 2018 2nd International Conference on Computer Science and Intelligent Communication (CSIC 2018) 2018*, pp. 82-88.
33. *Meraoumia A., Bendjenna H., Chitroub S.* Towards a robust palmprint representation for person identification, *International Journal of Information and Communication Technology*, 2019;14 (1), pp. 89-109.
34. *Khandizod A.G., Deshmukh R.R.* Analysis and Feature Extraction using Wavelet based Image Fusion for Multispectral Palmprint Recognition, *International J Enhanced Research in Management & Computer Applications*, ISSN. 2014:2319, pp.74-71.
35. *Poonia P., Ajmera P.K., Shende V.* Palmprint recognition using robust template matching. *Procedia Computer Science*, 2020 Jan 1167, pp. 727-736.
36. *Paoletti M.E., Haut J.M., Plaza J., Plaza A.* Deep learning classifiers for hyperspectral imaging: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019 Dec 1158, pp. 279-307.
37. *Schneider, Armin, and Hubertus Feussner.* Biomedical engineering in gastrointestinal surgery. Academic Press, 2017.
38. *Garg P.K.* Effect of contamination and adjacency factors on snow using spectroradiometer and hyperspectral images, *In Hyperspectral Remote Sensing*, 2020 Jan 1, pp. 167-196. Elsevier.
39. *Khandizod A.G., Deshmukh R.R.* Hyperspectral palmprint recognition: a review. In International Conference on Recent Trends and Challenges in Science and Technology (RTCST 2014), *Organized by Pravara Rural Education Society, Padmashri Vikhe Patil College of Arts, Science, and Commerce, Pravaranagar 2014 Aug.*, pp. 20-23.
40. *Thamri E., Aloui K., Naceur M.S.* Selection of hyperspectral bands by adopting a dimension reduction strategy for recognition of multispectral palmprint, *In 2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET) 2017 Jan 14*, pp. 91-96. IEEE.
41. *Jia S., Jiang S., Lin Z., Li N., Xu M., Yu S.* A survey: Deep learning for hyperspectral image classification with few labeled samples, *Neurocomputing*. 2021 Aug 11448, pp. 179-204.
42. *Reddy P.L., Pawar S.* Multispectral image denoising methods: A literature review. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;33:4666-70. Lewis JA. Forensic document examination: fundamentals and current trends. Elsevier; 2014 Jan 31, pp. 70-83.
43. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Multispectral_image.
44. *Mrs.Maheswari.MI, Ancy.S2, Dr. G.R. Suresh.* Survey On Multispectral Biometric Images, *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 1, Issue 4, June 2013 ISSN (Print): 2320 – 9798 ISSN (Online), pp. 220-239.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Аббасов.

Снехал С. Датвасе – Университет доктора Бабасахеба Амбедкара Маратвады; e-mail: snehaldatwase@gmail.com; Аурангабад, Индия; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; аспирант.

Доктор Р.Р. Дешмукх – e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; профессор.

Рохит С. Гупта – e-mail: rohitgupta8844@gmail.com; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; аспирант.

Snehal S. Datwase – Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University; e-mail: snehaldatwase@gmail.com; Aurangabad, India; the department of computer science and information technology; graduate student.

Dr. R.R. Deshmukh – e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; professor.

Rohit S. Gupta – e-mail: rohitgupta8844@gmail.com; the department of computer science and information technology; graduate student.

А.О. Касьянов

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

Статья посвящена рассмотрению возможности применения микрополосковых дифракционных решеток (МПДР), как устройств поляризационной селекции и трансформации. Ключевым компонентом таких устройств являются многоэлементные печатные решетки, в том числе и так называемые реконфигурируемые электродинамические структуры (ЭДС). Разработка и проектирование микроволновых компонентов в виде поляризационно-чувствительных многоэлементных МПДР требует создания адекватных математических моделей таких ЭДС, базирующихся на электродинамических методах. Исследование с помощью электродинамических моделей многоэлементных микрополосковых дифракционных решеток проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации электромагнитных волн (ЭМВ) в микроволновом диапазоне является весьма актуальной задачей современного антенностроения. На основе разработанной САПР-ориентированной математической модели электродинамического уровня созданы поверхностно-распределенные пространственные поляризаторы в виде многоэлементных плоских микрополосковых дифракционных решеток. Определены параметры плоских МПДР перспективных для применения в качестве СВЧ-компонентов современных радиотехнических комплексов (РТК) различного назначения. Выработаны рекомендации по применению микроволновых компонентов РТК, выполненных на основе МПДР, в антенных обтекателях, вспомогательных и фазокорректирующих рефлекторах зеркальных антенн, свернутых линзовых антеннах и при создании радиолокационных покрытий.

Дифракционная решетка; печатный элемент; микроволновый диапазон; поляризация; твист-рефлектор; фазовая коррекция; цифровое радиоэлектронное покрытие; поляризационный фильтр; бинарный модуль.

A.O. Kasyanov

**PRINTED LATTICES APPLICATION TO ELECTROMAGNETIC WAVES
POLARIZATION CONTROL AT MICROWAVES**

The paper is devoted to consideration of variants of solution to some problems of diffraction for printed arrays with anisotropic inhomogeneities. The rotation of the plane of polarization is realized by means of a twist-reflector. On the basis of computational and full-scale experiments it was shown that twist reflectors based on microstrip reflective type antenna arrays (RAA) can be quite broadband. The obvious advantage of such twist-reflectors is simplicity of the technology of their manufacture, small thickness and weight. In addition, in twist-reflectors based on printed RAA, it is possible to constructively realize the necessary phase distributions of the field on their surfaces. Thus, it becomes possible to use such twist-reflectors to create phase-correcting twist-reflectors. It is shown that introduction of impedance loads in the construction of the re-radiating elements of the printed RAA opens additional possibilities for controlling the field scattered by it. Thus, twist reflectors with improved characteristics can be realized on the basis of microstrip-pin RAA. The results of numerical studies based on the author algorithms and computational programs are presented. Besides, spatial polarizing filters and a controllable twist-reflectors based on microstrip RAA are considered. If microstrip elements of a twist-reflector contain controllable loads, then qualitatively new type of the microwave device is formed. This device enables to control polarization of the scattered field. Such devices can be named by polarizing modulators or manipulators. By means of printed RAA with elements of complex topology the spatial polarizers, which can transform electromagnetic waves with linear polarization in waves with rotating polarization and, in particular, in waves with circular polarization, are realized.

Grating; printed element; microwave range; polarization; twist-reflector, phase correction, digital radar cover, polarization filter, binary module.

Введение. В состав антенных систем современных радиотехнических комплексов СВЧ-диапазона входят устройства первичной обработки сигналов, производимой на несущей частоте [1]. В качестве устройств первичной обработки сигналов выступают различного рода селектирующие устройства, а именно: частотные, угловые и поляризационные фильтры, а также устройства управления поляризацией излучаемого или принимаемого поля. Эти устройства располагаются либо в фидерном тракте, либо помещаются непосредственно в излучающую систему антенны, образуя многофункциональный обтекатель [2–4]. Известно, что печатные дифракционные решетки, обладают не только частотно-угловой чувствительностью, но также могут обладать поляризационной избирательностью [5]. При этом одной из наиболее перспективных областей применения таких решеток являются интеллектуальные покрытия [6], выполняемые на основе реконфигурируемых электродинамических структур [7]. Разработка таких структур требуют создания высококачественных математических моделей решеток, базирующихся на электродинамических методах.

1. Отражательные антенные решетки и ФАР проходного типа в печатном исполнении. Широкое внедрение ФАР в практику тормозится их чрезвычайно высокой стоимостью и сложностью. Радиоэлектронные комплексы, построенные с применением многоэлементных ФАР, как правило, представляют собой уникальные по сложности и стоимости сооружения. Отказываться же от применения ФАР по указанным причинам неразумно. Гораздо более целесообразным представляется другой путь, связанный с решением проблемы создания конструктивно более простых и по возможности дешевых ФАР. Этим требованиям удовлетворяют весьма технологичные микрополосковые антенные решетки (АР), элементы которых имеют значительно более низкую стоимость. Еще одним направлением снижения стоимости решеток является возможность использования при построении ФАР более экономичных распределительных систем. Поэтому особое место среди АР упрощенной конструкции занимают *отражательные антенные решетки (ОАР)*. Степень упрощения в них велика, поскольку входные и выходные зажимы в решетке совмещены, стоимость ОАР значительно ниже обычных антенных решеток так называемого *проходного типа*. Кроме того, они могут применяться, не только как АР, т.е. устройства, позволяющие формировать требуемое пространственное распределение излучаемой мощности, но и для создания многочисленных устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации.

В монографиях автора [19, 44], а также в данной работе рассматриваются многоэлементные микрополосковые ФАР проходного и отражательного типа, а также СВЧ- и КВЧ-устройства пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации (рис. 1) и возможные области применения таких электродинамических структур.



Рис. 1. Устройства на основе многоэлементных печатных антенных решеток

Цель работы – исследование с помощью электродинамических моделей многоэлементных микрополосковых дифракционных решеток проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне (рис. 2), а также анализ результатов численного исследования на предмет возможного применения их, например, при создании метаматериалов [8] и киральных электродинамических структур [9].

2. Применение результатов математического моделирования к созданию поляризационно-чувствительных микрополосковых дифракционных решеток.

2.1. Твист-рефлекторы. Как правило, твист-рефлектор представляет собой отражательную антенную решетку (ОАР) [10]. Твист-рефлекторы находят применение в свернутых линзовых антеннах (ЛА). По сравнению с обычными ЛА свернутые антенны имеют меньшую благодаря введения в их состав твист-рефлекторов [11]. Кроме того, твист-рефлекторы применяют в зеркальных антеннах с механическим сканированием, где быстрое сканирование достигается движением легкого поляризатора [12].

Самыми очевидными конструктивными реализациями твист-рефлекторов являются, либо гребенчатая структура четвертьволновой ($\lambda/4$) глубины, либо частопериодическая решетка проводящих лент, нанесенных на диэлектрическую подложку толщиной $\lambda/4$, опирающаяся на сплошной проводящий экран. Помимо данного технического решения, как показано в табл. 1, наиболее популярными конструкциями печатных твист-рефлекторов являются:

- ◆ дифракционная решетка (ДР), составленная из прямоугольных МПЭ, расположенных в узлах сетки с прямоугольной формой единичной ячейки (ЕЯ), схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонке 2 строки 1 табл. 1 [11, 12];
- ◆ частопериодическая ДР, составленная из микрополосковых (печатных) вибраторов (МПВ), расположенных в узлах густой сетки с ЕЯ прямоугольной формы, схематическое изображение которой приведено в колонке 1 строки 1 табл. 1 [11, 13];
- ◆ ДР на основе печатных элементов (ПЭ), имеющих форму ленточных проводников (ЛП), каждый из которых изогнут в виде меандра, схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонке 3 строки 1 табл. 1 [13].

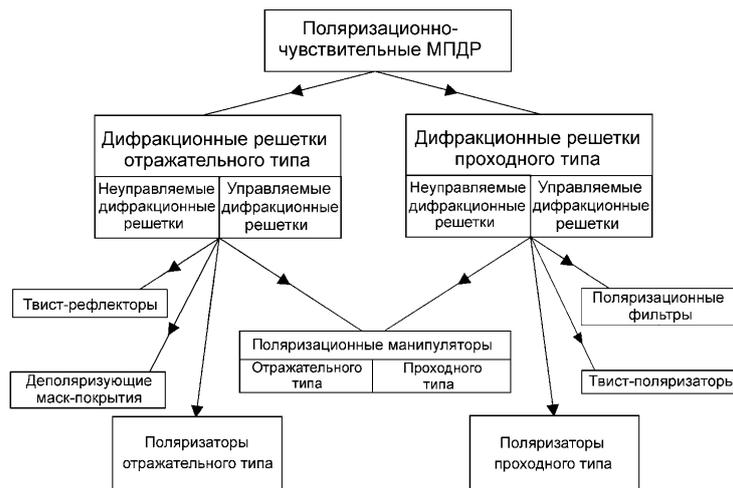


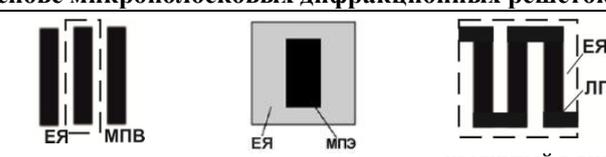
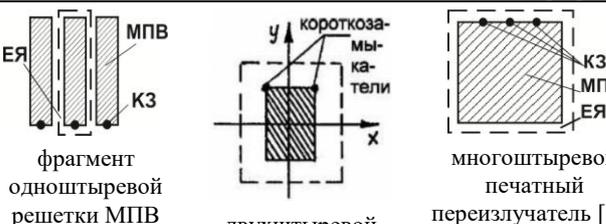
Рис. 2. Устройства поляризационной селекции и трансформации на основе МПДР

Как видно из табл. 1, также известны варианты конструктивной реализации твист-рефлекторов на основе совмещенных дифракционных решеток, в частности:

- ◆ совмещенная ДР печатных элементов, составленная из отдельных малоэлементных подрешеток ПЭ, в частности, печатных вибраторов, различающихся как шириной печатного проводника, так и шириной зазора, схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонках 1 и 2 строки 2 табл. 1 [12];
- ◆ совмещенная ДР, в состав подрешетки которой входит несколько одинаковых МПВ с периодичностью, отличной от периодичности размещения подрешеток ДР в целом [12].

Таблица 1

Типы печатных переизлучателей в твист-рефлекторах на основе микрополосковых дифракционных решеток

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
Твист-рефлекторы на основе микрополосковых дифракционных решеток		
1.	Печатные вибраторы, пластинчатые и меандровые переизлучатели (ЕЯ – единичная ячейка)	 <p>густая сетка из печатных вибраторов [5] пластинчатый ПЭ прямоугольной формы [13] изогнутый в виде меандра ленточный ПЭ [12]</p>
2.	Совмещенные решетки из печатных переизлучателей (МПВ – микрополосковый вибратор)	 <p>решетка из МПВ переменной ширины [12] решетка МПЭ с переменным зазором [12] каскадное включение решеток ортогональных МПВ [12]</p>
3.	Микрополосково-штыревые переизлучатели	 <p>фрагмент одноштыревой решетки МПВ [14] двухштыревой МПЭ [14] многоштыревой печатный переизлучатель [14]</p>

Особое место среди представленных в табл. 1 конструкций неуправляемых твист-рефлекторов в печатном исполнении занимает частотно-селективный твист-рефлектор, схематическое изображение которого приведено в колонке 3 строки 3 табл. 1. На резонансной частоте f_0 данная дифракционная решетка представляет собой твист-рефлектор, а на частотах $f \neq f_0$ ДР перестает быть отражательной, так как частично пропускает падающие на неё волны, поскольку вместо сплошного проводящего экрана в ней применяется частотно-избирательная поверхность (ЧИП) [15]. Такую электродинамическую структуру (ЭДС) можно рассматривать

как результат каскадного включения двух ДР, поскольку она содержит две решетки из МПВ, нанесенных на противоположных сторонах четвертьволнового диэлектрического слоя. При этом МПВ каждой из решеток ортогонально ориентированы друг относительно друга [12].

Введение штырей в состав ПЭ отражательных решеток открывает дополнительные возможности по трансформации поляризации возбуждающих их волн [11, 14, 16]. При корректном выборе их параметров твист-рефлекторы на основе микрополосково-штыревых отражательных решеток могут быть сделаны весьма широкополосными. В табл. 1 представлены:

- одноштыревые отражательные решетки (ОР), в которых к каждому МПВ подключается один проводящий штырь. Схематическое изображение фрагмента такой решетки приведено в колонке 1 строки 3 табл. 1. Для неуправляемых ЭДС каждый из штырей, являясь короткозамыкателем (КЗ), шунтирует соответствующий МПВ на сплошной проводящий экран, примыкающий к теневой стороне диэлектрической подложки, на освещенной стороне которой нанесена вибраторная решетка. При этом КЗ подключается середине узкой грани МПВ. Такие решетки являются частопериодическими. Твист-рефлекторы, выполненные на основе подобных решеток, являются широкодиапазонными. При этом с их помощью легко удается реализовать твист-эффект при отражении волн в полосе частот превышающей октаву [5].

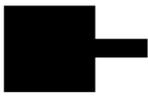
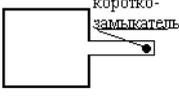
♦ двухштыревые ОР, в таких решетках к каждому прямоугольному МПЭ подключается два КЗ. Схематическое изображение ЕЯ такой решетки приведено в колонке 2 строки 3 табл. 1. Короткозамыкатели подключаются к двум смежным вершинам прямоугольного МПЭ, шунтируя на проводящий экран более узкую грань МПЭ. Такие твист-рефлекторы являются наиболее широкополосными из всех описанных выше [17];

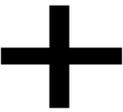
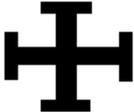
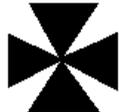
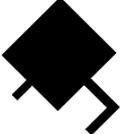
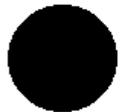
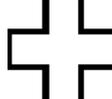
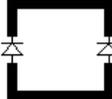
♦ многоштыревые печатные переизлучатели позволяют создавать ЭДС со свойствами приближающимися к ОР комбинированных элементов [18]. Схематическое изображение фрагмента такой решетки приведено в колонке 3 строки 3 табл. 1. Твист-рефлекторы, создаваемые на основе подобных ЭДС, по своим свойствам подобны гребенчатым структурам с Г-образно-изогнутыми канавками [19].

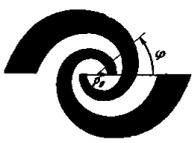
2.2. Зеркальные антенны с плоскими рефлекторами на основе микрополосковых отражательных антенных решеток. В плоских зеркальных антеннах ОАР выполняет роль фазокорректирующего рефлектора, преобразующего сферический фазовый фронт волны облучателя в плоский. При этом конструктивный синтез ОАР сводится к оптимальному подбору типа и размеров элементов ОАР, обеспечивающему при отражении необходимую фазовую задержку. Синтез должен учитывать и ряд дополнительных требований, связанных с пределами управления фазой отраженного поля, частотной стабильностью и т.п. Наиболее популярные конструкции элементов ОАР приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наиболее популярные типы микрополосковых излучателей в антенных решетках

№ п/п	Наименование излучателя	Топология микрополоскового излучателя		
1	Излучатель с реактивным шлейфом	 разомкнутый [20]	 короткозамкнутый [21]	 с «внутренним» питанием [22]

2	Печатные вибраторы и пластинчатые печатные излучатели	 печатный вибратор [20]	 антенна «бабочка» [23]	 пластинчатый МПИ [24]
3	Излучатели для работы на ортогональных поляризациях	 крестообразный [25]	 иерусалимский крест [26]	 мальтийский крест [27]
4	Печатные излучатели для работы на круговой поляризации	 пластинчатый с ортогональными шлейфами [23]	 дисковый МПЭ [28]	 кольцевой элемент [29]
5	Излучатели в виде печатных рамок	 прямоугольная рамка [30]	 крестообразная рамка [25]	 2 полурамочных МПЭ [31]
6	Совмещенные печатные излучатели	 пластинчато-рамочный [32]	 диско-кольцевой [33]	 один L – два L/2 МПВ [34]
7	Микрополосково-штыревые и комбинированные излучатели	 многостыревой с разомкнутым шлейфом [35]	 комбинация продол. с поперечным МПЭ [21]	 комбинированный микрополосково-штыревой [36]
8	Геометрические фракталоподобные элементы	 треугол. Серпинского [37]	 салфетка Серп. [37]	 квадрат Минковского [37]
9	Щелевые излучатели и элементы апертурного типа	 [38]	 [38]	 [39]

10	Спиральные излучатели	 <p>компактная 2-заходная спираль Архимеда [40]</p>	 <p>двухзаходная спираль Архимеда [41]</p>	 <p>логарифмическая печатная спираль [41]</p>
----	-----------------------	--	--	--

При создании печатных ОАР наибольшее распространение получили варианты их конструктивной реализации, в которых микрополосковые элементы снабжаются шлейфами на основе печатных линий передачи и, когда размеры или углы поворота вокруг собственных осей элементов варьируются в зависимости от их местоположения на переизлучающем полотне отражательной решетки так, чтобы ОАР обеспечивала требуемую фокусировку поля облучателя. Возможность фокусировки может достигаться также и в микрополосковых ОАР с неэквидистантным расположением элементов.

Для реализации необходимой фазовой задержки при отражении от печатной решетки требуется изменять топологию и размеры полосковых элементов и определять при этом фазу коэффициента отражения на согласованной поляризации. Рассмотрим возможность применения в качестве плоского фокусирующего рефлектора нескольких видов отражательных решеток, составленных из элементов относительно несложной геометрии. Для наиболее простых типов излучателей – полосковых вибраторов, в том числе и крестообразных, (строки 2 и 3 табл. 2) результаты расчетов и экспериментов по определению зависимости фазовой задержки от длины вибратора свидетельствуют о возможности использования печатных полосковых вибраторных решеток для построения плоского фокусирующего рефлектора. В этом случае требуемое для фазовой коррекции изменение фазы коэффициента отражения происходит лишь в окрестности частоты резонанса данной ДР. При этом повышенная крутизна фазовой характеристики приводит к неустойчивому решению и сужению частотного диапазона работы такого рефлектора. Для решетки, составленной из квадратных полосковых элементов приведены диапазон изменения фазовой задержки в зависимости от относительного их размера достаточно велик. Выбором толщины подложки можно обеспечить довольно протяженный участок характеристики, близкий к линейному с пониженной крутизной, что соответствует уменьшенному значению добротности полоскового резонатора решетки.

Добиваясь понижения крутизны характеристики выбором толщины подложки, можно обеспечить компромисс между значением крутизны и диапазоном возможных изменений фазы коэффициента отражения.

Также представляет интерес исследование возможности регулировать вид фазовой характеристики за счет дополнительного усложнения топологии полоскового элемента решетки, направленного на введение вспомогательных частотно-зависимых элементов, изменяющих резонансные и частотные свойства решетки. Таким вспомогательным элементом может служить шлейф, подключенный к полосковому элементу. Подключение подобного разомкнутого на конце шлейфа к полосковому переизлучателю прямоугольной или квадратной формы (строка 1 табл. 2) придает фазовой характеристике элемента решетки фазокорректирующего рефлектора желаемый вид. Кроме того, такие излучатели практически не изменяют уровень кроссполяризации. Они могут быть рекомендованы для построения фокусирующих рефлекторов, работающих на линейной поляризации.

При построении фазокорректирующих рефлекторов достаточно эффективным оказывается также подход, основанный на повышении степени взаимной связи между излучателями решетки и ее регулировании. Возможность коррекции частотной зависимости фазы коэффициента отражения при уменьшении расстояния между излучателями полосковой щелевой решетки показана автором в работе [28], где показано, что микрополоско-щелевой излучатель может быть рекомендован к применению в качестве элемента плоского фокусирующего рефлектора.

Используя понятие об эквивалентном линейном излучателе, можно считать, что регулировка значения фазовой задержки коэффициента отражения за счет выбора характерного размера полоскового элемента может выполняться при использовании элементов любой формы. Однако следует иметь в виду, что при этом эквивалентное амплитудно-фазовое распределение существенным образом зависит от формы элемента. Поэтому, несмотря на общие признаки в характере поведения фазовых зависимостей, пределы регулирования и значение крутизны определяются конкретным выбором формы элемента решетки. Например, в [28] рассмотрена конструкция плоского рефлектора в виде решетки печатных колец. Подбором размеров элементов в таких решетках можно с успехом управлять значением фазы коэффициента отражения. Симметрия элементов решетки позволяет использовать ее для фазовой коррекции поля не только линейной, но и круговой поляризации.

Работа на круговой поляризации (строка 4 табл. 2) открывает дополнительные возможности по фокусировке поля облучателя с помощью так называемых спирафазных излучателей. В этом случае необходимую фазовую коррекцию можно получить за счет поворотов элементов ОАР на разные углы. При этом угол разворота отдельного излучателя АР определяется той фазовой задержкой, которую должен внести этот элемент в отраженное поле. Примеры конструктивной реализации зеркальных антенн с плоскими рефлекторами в виде спирафазных печатных ОАР рассмотрены автором в монографии [42].

Спирэфазные излучатели могут с успехом применяться не только в зеркальных, но и в линзовых антеннах-решетках. Перспективными представляются разработки линз на основе полосковых спирафазных излучателей [43]. В качестве последних удастся применять широкополосные излучатели, полосковый элемент которых имеет форму спирали Архимеда (строка 10 табл. 2). Из таких излучателей формируется как коллекторная решетка, так и излучающая. Требуемая фазовая задержка для каждого элемента излучающей АР обеспечивается поворотом на соответствующий угол передающего элемента по отношению к приемному.

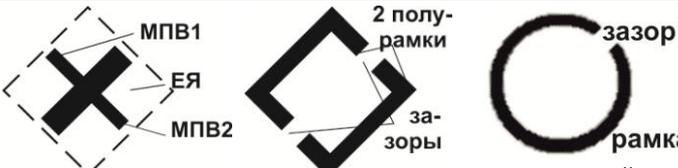
2.3. Фазокорректирующие твист-рефлекторы (ФКТР). В основу принципа построения фазокорректирующего твист-рефлектора (ФКТР) положена возможность реализации с помощью плоской печатной дифракционной решетки или перфорированного проводящего экрана, не только функции перевода при отражении поляризации падающей волны на ортогональную, но и одновременной фазовой коррекции падающей волны [44–46]. Некоторые из наиболее распространенных типов МПЭ и щелевых элементов ФКТР приведены в табл. 3. Следует заметить, что помимо, приведенных в табл. 3, широкое распространение получили решетки МПЭ и щелевые экраны с элементами простой геометрической формы, в частности, прямоугольной, как показано в колонке 2 строки 1 табл. 1. Данное техническое решение является достаточно удобным при отыскании требуемой топологии ФКТР, но только с точки зрения простоты численного моделирования. В то же время ФКТР, выполненные на основе ДР из прямоугольных печатных и щелевых элементов, оказываются весьма узкополосными, а следовательно, уступают в технологичности изготовления, представленным в табл. 3.

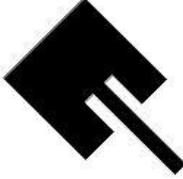
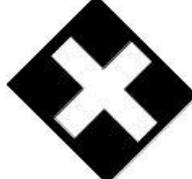
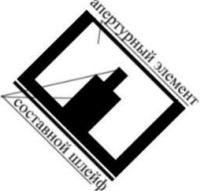
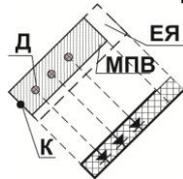
В качестве примера рассмотрим некоторые из приведенных в табл. 3 топологий ПЭ отражательных решеток, выступающих в качестве ФКТР. Например, в работе автора [47] описана свернутая ЗА, в которой каждый МПЭ её плоского рефлектора представляет собой пластинчатый переизлучатель прямоугольной формы. В прямоугольных пластинах выполнены прорезы (как показано на рисунке, приведенном в колонке 1 строки 3 табл. 3). Как видно из данного рисунка, к короткозамкнутым торцам прорезей, выполненных в каждом из пластинчатых МПЭ, подключены шлейфы, представляющие собой разомкнутые отрезки МПЛ. С одной стороны, подбирая глубину прореза и длину шлейфа, можно регулировать фазу отраженного поля. С другой стороны, ориентируя МПЭ относительно плоскости поляризации падающей волны так, как показано на рисунке, можно при отражении повернуть на угол 90° плоскость поляризации падающей на ОАР волны. Таким образом, данная ОАР представляет собой ФКТР для свернутой ДЗА [46].

В работе [46] описана свернутая МПОАР, в качестве печатных переизлучающих элементов ФКТР которой выступают квадратные МПЭ со шлейфами. Топологии таких элементов показаны на рисунках, изображенных в строке 2 табл. 3. Например, на рисунке, приведенном в колонке 2 строки 2, показано, что каждый квадратный МПЭ печатной решетки повернут на угол 45° относительно плоскости поляризации возбуждающей ФКТР волны. Для реализации эффектов поворота плоскости поляризации и фокусировки при отражении к каждому квадратному МПЭ присоединены два разомкнутых шлейфа. При этом шлейфы подключаются к смежным граням квадратного МПЭ.

Таблица 3

Типы печатных переизлучателей в фазокорректирующих твист-рефлекторах, выполненных на основе микрополосковых дифракционных решеток

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
Фазокорректирующие твист-рефлекторы на основе многоэлементных МПДР		
1.	Переизлучатели в виде скрещенных печатных вибраторов, рамочных и кольцевых ПЭ с разрывами печатных проводников	
2.	Переизлучатели с разомкнутыми реактивными шлейфами	

3.	Пластинчатые переизлучатели с настроечными шлейфами и прорезями, а также щелевые простой формы	 <p>пластинчатый МПЭ с «внутренним» питанием [46]</p>	 <p>крестообразные щелевые элементы [12]</p>	 <p>кольцевой щелевой элемент с разрывом [46]</p>
4.	Щелевые переизлучатели сложной формы и сканирующие вибраторные (К – короткозамыкатель; Д – СВЧ-диод; МПВ – печатный вибратор)	 <p>апертурный элемент 1 [46]</p>	 <p>апертурный элемент 2: 1 – с настроечной прорезью; 2 – шлейфом [12]</p>	 <p>единичная ячейка сканирующего ФКТР на основе МПВ с УЭ [46]</p>

Ещё одной разновидностью микрополосковых переизлучателей ФКТР, применяемых в свернутых ОАР ММВ-диапазона, являются МПЭ в виде незамкнутых печатных колец, топологии которых показаны на рисунке, изображенном в колонке 3 строки 1 табл. 3. Подбирая параметры кольцевых элементов, соответствующие различным фазовым задержкам, реализуемым такими отражательными фазовращателями, а также ориентируя зазоры в них под углом 45° к плоскости поляризации, можно добиться, не только корректировки фазового распределения на плоскости ОАР, но и такого преобразования поляризации поля отраженной волны, когда полосковая решетка одновременно выполняет функции как фазокорректирующего рефлектора, так и твист-рефлектора.

На рисунке, изображенном в колонке 3 строки 4 табл. 3, схематически показана ЕЯ сканирующего фазокорректирующего твист-рефлектора, выполненная в виде микрополосково-штыревой ОАР. Для обеспечения электронного сканирования лучом ДН такой ДР в её состав необходимо вводить штыри с управляемым поверхностным импедансом, моделирующих управляемые СВЧ-приборы, например, *p-i-n* – диоды. В работе автора [48], показано, что переключение диодов позволяет дискретно управлять фазой коэффициента отражения такой решетки. Как следует из изложенного выше, при соответствующем подборе размеров МПВ и ЕЯ решетки, а также мест включения *p-i-n* – диодов, с помощью данной ДР можно не только управлять фазой, но и поляризацией отраженной волны. Таким образом, расчетным путем показана возможность построения ФКТР с электронным сканированием на основе описанной в [48] управляемой МПДР.

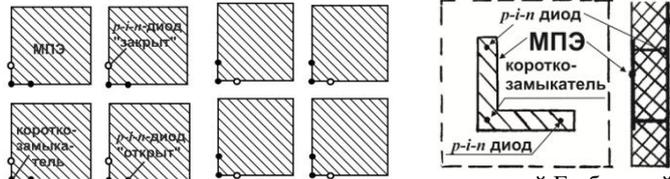
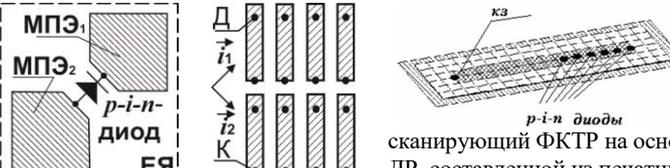
2.4. Полосковые отражательные решетки с управляемыми элементами. Примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля является, описанный в работе [49] поляризационный манипулятор, представляющий собой планарную периодическую структуру, составленную из МПЭ с подключенными к ним управляющими

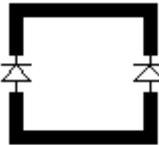
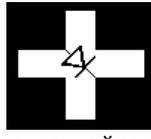
элементами СВЧ. Как показано в работе автора [49], для введения управляющих элементов (УЭ) в состав решетки, составленной из проводящих лент, требуется усложнять топологию ленточных проводников, вводя в неё дополнительные печатные шлейфы. При этом эти шлейфы являются разомкнутыми и включаются поперек ленточной решетки, образуя периодические решетки, каждая из которых ориентирована в направлении установки ленточных проводников. По существу, такая дифракционная решетка представляет собой решетку лент переменной ширины. Модуляция ширины ленточных проводников является периодической и реализуется посредством поперечных лентам разомкнутых шлейфов. При помещении такой решетки лент модулированной ширины над проводящим экраном при соответствующем подборе параметров удастся построить твист-рефлектор, а включением УЭ (переключательных СВЧ-диодов) в узкие места зазоров между лентами можно добиться управляемости такого твист-рефлектора. Таким образом, как показано в работе автора [49], создается поляризационный манипулятор (ПМ).

В работах автора [5, 7, 10, 49] приведены характеристики рассеяния ПМ, топология которого показана на рисунке, изображенном в колонке 2 строки 3 табл. 4.

Таблица 4

Типы печатных переизлучателей в отражательных решетках с управляемой поляризацией поля

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
Управляемые твист-рефлекторы на основе печатных дифракционных решеток		
1.	Модули цифровых управляемых деполаризующих радиолокационных покрытий (ЭДС – электродинамическое состояние)	 <p>модуль бинарного упр. покрытия в ЭДС «0» [50]</p> <p>то же в ЭДС «1»:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● - диод открыт; ○ - диод закрыт [50] <p>изогнутый Г-образный МПВ с КЗ и двумя <i>p-i-n</i>-диодами [50]</p>
2.	Решетки реконфигурируемых МПВ и пластинчатых МПЭ (К – короткозамыкатель, Д – СВЧ-диод)	 <p>решетка типа «шахматная доска» с диодами [5]</p> <p>управляемая дифр. решетка МПВ [14]</p> <p>сканирующий ФКТР на основе ДР, составленной из печатных вибраторов с <i>p-i-n</i>-диодами [16]</p>

3.	Печатные переизлучатели в виде реконфигурируемых печатных колец, рамок и щелей	 <p>кольцевой печатный элемент с 2-мя УЭ [13]</p>	 <p>поляризационный манипулятор рамочного типа [49]</p>	 <p>проводящий экран с переключаемыми кресто-образными щелями [5]</p>
----	--	--	--	--

Помимо данного варианта конструктивной реализации ПМ в виде реконфигурируемых печатных рамок (колонка 2 строки 3 табл. 4), в публикациях автора, ссылки на которые указаны в табл. 4, приведены схематические изображения вариантов конструктивной реализации ПМ на основе пластинчатых (колонка 1 строки 2 табл. 4), вибраторных (колонка 2 строки 2 табл. 4), кольцевых (колонка 1 строки 3 табл. 4) и апертурных элементов (перфорирование крестообразными щелями проводящего экрана), как показано на рисунке, приведенном в колонке 3 строки 3 табл. 4.

Вторым примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля являются микроволновые компоненты деполаризующих радиолокационных покрытий. Так в работе автора [50] описан класс управляемых отражательных решеток на основе анизотропных бинарных структур с цифровым управлением. Принцип работы таких решеток основан на комплексном использовании явлений деполаризации, интерференции и дифракции отраженных ими волн. Введение в состав МДР управляемых элементов (СВЧ-диодов) позволяет цифровым образом управлять электродинамическими характеристиками (ЭДХ) таких структур. Для достижения цифрового управления все элементы решетки разбиваются на группы (модули). При этом каждый модуль может находиться, как минимум, в двух электродинамических состояниях (ЭДС), определяемых тем, в каком состоянии пребывают управляемые элементы модуля – в открытом или закрытом. При этом под бинарностью каждого модуля понимается его способность находиться в одном из двух ЭДС. Состояние модулей контролируется процессором компьютера. Количество возможных состояний цифровой МДР пропорционально количеству модулей и числу допустимых состояний каждого модуля. Понятно, что такая цифровая ЭДС обладает множеством радиолокационных образов, управление которыми позволяет создавать, например, “интеллектуальные” покрытия (ИП) [6], способные адаптироваться к радиолокационной обстановке. Для цифрового управления характеристиками рассеяния такой отражательной решетки в конструкцию каждого МПЭ вводится несколько управляемых нагрузок (СВЧ-диодов), как показано в табл. 4. В зависимости от функционального назначения СВЧ-диоды могут играть роль, либо фазовращателей, либо коммутационных элементов. В случае, когда в качестве подложки такой печатной решетки выступает кристаллический полупроводник, диоды станут неотъемлемой её частью, а ЭДС будет представлять собой неразборную (твердотельную) конструкцию. В табл. 4 приведено схематическое изображение некоторых из возможных вариантов построения таких модулей в виде МПДР с управляемыми элементами (УЭ). В частности, в колонках 1 и 2 строки 1 табл. 4 показаны варианты ориентации «зашунтированной» грани МПЭ модуля ИП, где указано, что двум комбинациям включения УЭ, входящих в состав таких модулей, ставятся в соответствие бинарные состояния ИП. Таким образом, изменяя проводимость диодов, можно управлять ЭДС модуля управляемой ДР. В работе [50] показано, что технические решения, представленные в строке 1 табл. 4, позволяют выработать рекомендации по конструктивному синтезу адаптивных малоотражающих покрытий с цифровым управлением характеристиками рассеяния путем изменения ЭД состояний их модулей, построенных на основе бинарных микро-

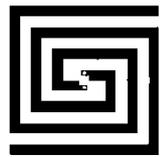
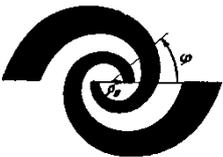
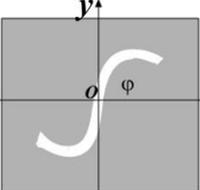
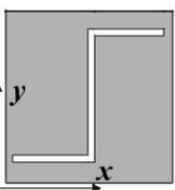
полосково-штыревых подрешеток. Среди представленных в строке 1 табл. 4 вариантов конструктивной реализации модулей бинарных покрытий особое место занимает вариант, топология которого изображена в колонке 3 строки 1 табл. 4, поскольку при объединении его в единый конструктив с вариантами, представленными в колонках 1 и 2 строки 1 табл. 4, позволяет получить совмещенную решетку бинарного модуля, обладающего расширенным функционалом по сравнению с рассмотренными выше вариантами построения таких бинарных модулей ИП.

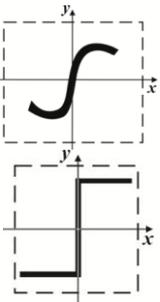
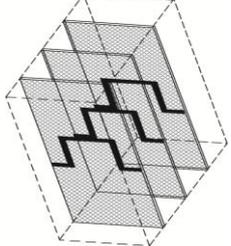
И, наконец, ещё одним примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля является построение сканирующего ФКТР на основе вибраторной решетки отражательного типа, к каждому элементу которой подключаются $p-i-n$ -диоды, шунтирующие его на сплошной проводящий экран, примыкающий к теневой стороне подложки, как показано на рисунке, приведенном в колонке 3 строки 2 табл. 4.

2.5. Поляризаторы проходного и отражательного типа. В табл. 5 представлены топологии печатных и апертурных элементов ОАР [51], которые удобно использовать для преобразования поляризации поля падающей на отражательную решетку волны линейной поляризации во вращающуюся и наоборот. В строке 1 табл. 5 представлены топологии печатных спиральных элементов дифракционных решеток, являющих одним из наиболее распространенных вариантов конструктивной реализации таких пространственных поляризаторов, как проходного, так и отражательного типа. При этом следует заметить, что среди представленных в табл. 5 вариантов особый интерес представляет решетка из спиральных элементов, каждый из которых представляет собой двухзаходную квадратную спираль Архимеда (колонка 1 строки 1 табл. 5).

Таблица 5

Типы печатных элементов пространственных поляризаторов проходного и отражательного типа на основе печатных и щелевых дифракционных решеток

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки		
1	Спиральные переизлучатели	 <p>компактная 2-заходная спираль Архимеда [5]</p>	 <p>двухзаходная спираль Архимеда [19]</p>	 <p>логарифмическая печатная спираль [52]</p>
2	Щелевые переизлучатели сложной формы	 <p>S – образный щелевой переизлучатель ДР [53]</p>	 <p>Z – образный щелевой переизлучатель ДР [53]</p>	 <p>щелевой элемент «two-finger hand» (TFH). TFH – терминология из [9]</p>

3	Печатные переизлучатели сложной формы		 <p>ПЭ сопряженные щелевым элементам строки 2</p>	 <p>меандровый поляризатор [54]</p>
---	---------------------------------------	---	--	--

Среди топологий печатных и щелевых элементов поляризаторов проходного и отражательного типа, показанных на рисунках, помещенных в строках 2 и 3 табл. 5, следует выделить многоступенчатые печатные поляризаторы проходного типа на основе меандровых линий передачи (колонка 3 строки 3 табл. 5) [54], нашедшие широкое распространение на СВЧ при создании АО с преобразованием поля линейной поляризации в поле вращающейся поляризации (обычно круговой) и наоборот.

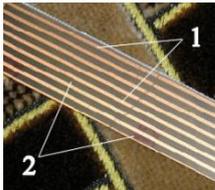
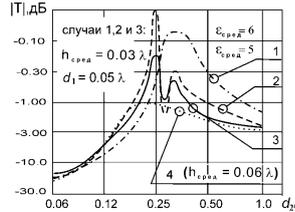
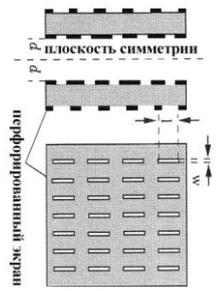
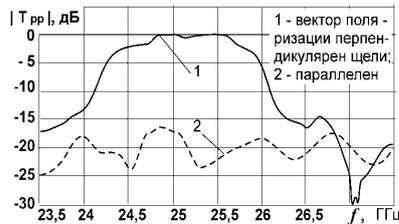
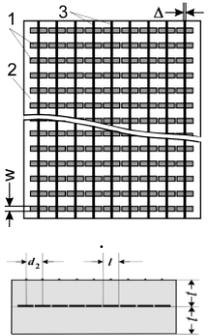
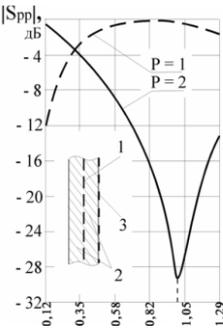
Реализовать не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот) можно с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (S- и Z-образных, а также TFH-элементов, показанных на рисунках, помещенных в строке 2 и колонках 1 и 2 строки 3 табл. 5).

2.6. Поляризационные фильтры. Для защиты антенн различных радиоэлектронных средств, в процессе эксплуатации подвергающихся неблагоприятному воздействию окружающей среды, используются радиопрозрачные антенные обтекатели [4]. Включение в состав таких обтекателей дифракционных решеток позволяет не только решать задачи обеспечения герметичности, но и одновременно обеспечивать поляризационную селекцию и трансформацию. Примеры применения таких обтекателей при создании антенн судовых радионавигационных станций [55, 56] и свернутых зеркальных (ЗА) и линзовых (ЛА) антенн рассмотрены в работах автора [11, 13, 44-46]. С целью обобщения накопленного опыта создания подобных антенных обтекателей (АО) некоторые варианты их конструктивной реализации удобно представить в виде табл. 6.

Высокая радиопрозрачность является важнейшей эксплуатационной характеристикой антенного обтекателя. Повышенной радиопрозрачностью обладают, предложенные автором в [55], обтекатели выполненные на основе двухстороннего фольгированного диэлектрического слоя, например, стеклотекстолита, как показано на снимке, помещенном в строке 1 табл. 6. На обеих сторонах стеклотекстолитовой подложки толщиной h вытравливаются две печатные решетки взаимно ортогональных лент. В плане эти решетки образуют сетку с прямоугольной формой ЕЯ. При этом одна из решеток (частопериодическая) выполняет функции поляризационного селектора, а вторая (просветляющая) позволяет повысить радиопрозрачность АО, как видно из графиков, обозначенных цифрами 1 и 2, показанных на рисунке, помещенном в строке 1 табл. 6.

Таблица 6

Типы поляризационных фильтров на основе печатных решеток и перфорированных экранов

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топологии печатных/щелевых элементов дифракционных решеток – поляризационных фильтров и их характеристики рассеяния
1.	Металлодиэлектрические ЭДС на основе решеток проводящих лент	 <p>Снимок фрагмента обтекателя – поляризац. фильтра, где: 1 – ленточные медные проводники; 2 – диэлектрический слой, разделяющий решетки лент [56]</p>  <p>ЧХ коэф. прохождения волн сквозь обтекатель – ПФ [57]</p>
2.	Перфорированные экраны в составе многослойных металлодиэлектрических ЭДС	 <p>квазиоптический фильтр [46]</p>  <p>Расчетные ЧХ фильтров на основе 4 перфорированных экранов, попарно нанесенных на обеих сторонах каждой из двух фторопластовых подложек толщиной примерно 3,2 мм, [9]</p>
3.	Вибраторные решетки и решетки лент в составе многослойных металлодиэлектрических ЭДС	 <p>частотно-избирательный ПФ на основе ДР лент и вибратора.</p>  <p>Частотные характеристики элементов ПМР четырехслойного ПФ, состоящего из: 1 - вибраторной печатной ДР, выполняющей функции поляризационного селектора; 2 - два диэлектрических слоя; 3 - «просветляющая решетка» - решетка лент ортогонально ориентированных по отношению к микрополосковым вибраторам поляризационного селектора [58, 59]</p>

С точки зрения необходимости обеспечения требуемых условий эксплуатации предпочтение следует отдавать конструкциям, в которых решетки металлических лент укрываются защитным слоем из стеклоткани. Таким усложненным конструкциям соответствуют графики, обозначенные цифрами 3 (для случая одностороннего нанесения стеклоткани) и 4 (для случая двухстороннего нанесения стеклоткани).

Еще одним вариантом конструктивной реализации ПФ в виде металлодиэлектрической ЭДС является квазиоптический фильтр, выступающий в качестве вспомогательного плоского рефлектора свернутой ЗА, схематическое изображение которого показано на рисунке, помещенном в строке 2 табл. 6. Как видно из рисунка, ПФ построен на основе многослойной планарной решетки, выполненной в виде перфорированных экранов, разделенных диэлектрическими слоями. Расчетная ЧХ такого квазиоптического фильтра показана на рисунке, помещенном в строке 2 табл. 6. По сравнению с обычным сеточным ПФ такой квазиоптический фильтр обеспечивает лучшее подавление боковых лепестков ДН свернутой ЗА, причем в наибольшей степени оно проявляется для боковых лепестков диаграммы направленности ЗА, не входящих в сектор прозрачности углового фильтра [4]. Однако, из-за потерь в многослойной диэлектрической подложке, коэффициент усиления антенны с вспомогательным рефлектором в виде квазиоптического фильтра несколько ниже, чем в ЗА, в качестве ПФ которой выступает частопериодическая решетка лент.

Преодолеть недостатки описанных выше вариантов конструктивной реализации ПФ удастся в конструктиве, выполненном в виде многослойной структуры, состоящей из диэлектрических слоев и решеток МПЭ. В этом случае полосковая ДР и печатный ПФ оказываются совмещенными в единой конструкции, представляющей собой решетку микрополосковых вибраторов (МПВ) с поляризационно-селективным полупрозрачным экраном, как показано на рисунке, помещенном в строке 3 табл. 6. Там же приведены состав и основные результаты конструктивного синтеза поляризационно-избирательного вспомогательного плоского рефлектора свернутой ЗА. Как видно из графиков, представленных на рисунке, помещенном в строке 3 табл. 6, такая структура на частоте f_0 обеспечивает высокий уровень отражения волн облучателя ($|S_{11}| = -0,11$ дБ) и высокую прозрачность для волн отраженных от основного зеркала свернутой ЗА ($|S_{22}| = -29,2$ дБ).

Выводы. С помощью разработанных электродинамических моделей исследованы многоэлементные микрополосковые дифракционные решетки проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации волн в микроволновом диапазоне. Проведен анализ результатов численного исследования на предмет возможного применения. Так в части АО для судовых радионавигационных комплексов показана целесообразность применения многослойных решеток, позволяющих добиться высокой радиопрозрачности на рабочей линейной поляризации в сочетании фильтрацией волн кросс-поляризации за счет объединения частопериодической решетки поляризационного селектора с «просветляющей» решеткой проводящих лент.

Показана возможность эффективного использования разработанной математической модели периодической решетки МПЭ при проектировании твист-поляризаторов. Благодаря достаточной универсальности модели удалось исследовать твист-поляризаторы не только в виде однослойных решеток с МПЭ простой формы, но и в виде совмещенных и многослойных решеток. Применение последних позволяет строить твист-поляризаторы, не только улучшенными диапазонными характеристиками, но и создавать многофункциональные устройства. При этом введение управляемых нагрузок ($p-i-n$ -диодов) в состав единичной ячейки печатной ДР позволяет, не только расширить полосу рабочих частот тонкослойных МДР-поляризаторов для ДЗА с поворотом плоскости поляризации, но и построить сканирующий ФКТР.

В результате проведенного численного исследования характеристик рассеяния (ХР) управляемых твист-рефлекторов на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток (МПР) установлена взаимосвязь между конструктивными параметрами МПР и ХР, создаваемых на их основе твист-рефлекторов. Численно выявлен эффект аномального рассеяния волн МПР твист-рефлектора при наклонном падении на неё возбуждающей волны. Показана возможность построения цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией, составленного из реконфигурируемых СВЧ-модулей, выполненных на основе печатных отражательных решеток, каждый из элементов которых снабжен управляемыми нагрузками.

Показано, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию, открывает дополнительные возможности по поляризационной фильтрации и трансформации поляризации полей, отраженных от и/или прошедших сквозь такие решетки волн. В частности, показано, что с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (TFH, S- и Z-образных, а также спиральных) реализуются не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот).

Таким образом, в статье показано, что по целому ряду функциональных назначений полосковые ОАР могут составить набор базовых элементов для создания компонентов интеллектуальных покрытий, предназначенных для работы в микроволновом диапазоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобов Г.Д. Устройства первичной обработки микроволновых сигналов: Физические принципы. Анализ и синтез. Применения. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 255 с.
2. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Расчет и экспериментальное исследование многофункционального обтекателя судовой антенны // Радиотехника. – 2004. – № 4. – С. 51-56.
3. Касьянов А.О. Частотно-избирательный обтекатель на основе металлodieлектрических дифракционных решеток и перфорированных экранов // Антенны. – 2021. – № 3. – С. 39-49.
4. Касьянов А.О. Антенный обтекатель с угловой фильтрацией на основе металлodieлектрических дифракционных решеток // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 7. – С. 70-79.
5. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Пространственные поляризационные фильтры, преобразователи и манипуляторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2011. – № 7. – С. 43-51.
6. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Современное состояние и проблемы. Обзор // Антенны. – 2001. – № 4 (50). – С. 4-11.
7. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // Антенны. – 2001. – № 4 (50). – С. 12-16.
8. Братчиков А.Н. СВЧ-устройства, излучатели и ФАР на основе новых метаматериалов и структур // Антенны. – 2009. – № 1 (140). – С. 1-71.
9. Zouhdi S., Couepon G.E., Fourier-Lamer A. Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements // IEEE Transactions on antennas and propagation. – June 1999. – Vol. 47, No. 6. – P. 1061-1065.
10. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника. 2006. – 240 с.
11. Касьянов А.О., Касьянова А.Н. Применение печатных отражательных решеток для создания микроволновых линз с улучшенными характеристиками // Антенны. – 2018. – № 8. – С. 17-23.
12. Касьянов А.О. Твист-поляризаторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 5 (60). – С. 34-39.

13. *Касьянов А.О., Саплин П.П.* Свернутая линзовая антенна ММВ-диапазона на основе широкополосных микрополосковых ОАР // Научно-технический сборник «Общие вопросы радиоэлектроники». – Ростов-на-Дону: Изд-во ФГУП «РНИИРС», 2012. – С. 13-18.
14. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Управление токами в микрополосковой антенной решетке с нагруженными элементами // Радиотехника. – 1995. – № 12. – С. 32-36.
15. *Касьянов А.О.* Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
16. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Заковоротный С.И.* Расширение функций плоского фазо-корректирующего рефлектора при включении импедансных нагрузок // Радиотехника. – 2006. – № 2. – С. 60-64.
17. *Kasyanov A.O.* Modeling of the Microstrip-Stubs Reflectarrays with the Digital Control of Scattering Characteristics at Microwaves // Proc. of the 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, 31 May – 3 June 2005, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. – P. 467-474.
18. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Китайский М.С.* Математическая модель микрополосковой отражательной антенной решетки комбинированных излучателей // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 5. – С. 56-65.
19. *Касьянов А.О. и др.* Разработка и применение композитных материалов с требуемыми свойствами: монография / под ред. М.Ю. Звездиной. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. – 198 с.
20. *Касьянов А.О., Мушников В.В., Обуховец В.А.* Характеристики направленности конечных многоэлементных плоских микрополосковых отражательных антенных решеток // Радиотехника. – 2008. – № 11. – С. 64-72.
21. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Загоревский В.И.* Численное моделирование микрополосковой фазированной антенной решетки // Научно-технический журнал НТОРЭС А.С. Попова «Радиотехника». – 2002. – № 12. – С. 57-64.
22. *Касьянов А.О.* Двухзеркальная антенна Кассегрена на основе решеток печатных элементов // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 17-22.
23. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // Антенны. – 2005. – Вып. 9 (100). – С. 4-12.
24. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Электродинамическое моделирование и конструктивный синтез планарных частотно-избирательных поверхностей // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 24-32.
25. *Обуховец В.А., Касьянов А.О., Загоревский В.И.* Анализ частотно-селективных структур с элементами сложной формы // 11th International Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2001), 10-14 Sept. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2001. – P. 368-370.
26. *Хитров Ю.А.* Коммутируемая микрополосковая антенна // Научно-технический журнал НТОРЭС А.С. Попова «Радиотехника». – 1992. – № 3. – С. 62-65.
27. *Guo Y.J., Barton S.K.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1995. – Vol. AP-43, No. 4. – P. 350-355.
28. *Обуховец В.А.* Проблемы конструктивного синтеза отражательных антенных решеток // Антенны. – 1997. – Вып. 2 (39). – С. 17-24.
29. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности и поляризационные модуляторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Матер. 8-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 14-17 сентября 1998, Севастополь. Т. 2. – С. 451-453.
30. *Касьянов А.О.* Характеристики рассеяния микрополосковых отражательных антенных решеток с импедансными включениями // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 23-28.
31. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Загоревский В.И., Мельников С.Ю.* Комплекс программ по проектированию отражательных антенных решеток // Программные продукты и системы. – 2002. – Вып. 1. – С. 9-12.
32. *Касьянов А.О.* Численное исследование частотно-избирательных поверхностей с фрактальными элементами // Антенны. – 2005. – Вып. 9 (100). – С. 13-19.
33. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Результаты численного моделирования микрополосково-штыревой отражательной антенной решетки // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 4-9.
34. *Касьянов А.О., Китайский М.С.* Результаты численного исследования плоской ретенной решетки печатных комбинированных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 204-208.

35. Касьянов А.О. Численное исследование частотно-избирательных поверхностей с фрактальными элементами // Антенны. – 2005. – № 9. – С. 13-19.
36. Касьянов А.О. Волноводное моделирование частотно-селективных структур на основе микрополосковых дифракционных решеток // Междоуведомственный сборник научных статей «Рассеяние электромагнитных волн». – 2003. – Вып. 12. – С. 121-127.
37. Касьянов А.О. Численное исследование металлodieлектрических частотно-избирательных решеток с печатными и апертурными элементами // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – Т. 15, № 5. – С. 47-55.
38. Kasyanov A.O. The radiating properties of spiraphase reflector based on microstrip array // Proceeding of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'99), Sevastopol, 1999. – P. 328-330.
39. Касьянов А.О. Анализ микрополосковой фазированной антенной решетки // Наукові Вісті. – 2001. – № 4 (18). – С. 25-33.
40. Kump D.G., Himdi M., Rudberg A. Design of an unequally spaced reflectarray // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2000. – Vol. 2.
41. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Рассеяние волн периодической решеткой с пассивными нагрузками // Сб. "Рассеяние электромагнитных волн". – Таганрог: ТРТИ, 1987. – Вып. 6. – С. 19-25.
42. Касьянов А.О. Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.
43. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Конструктивный синтез зеркальной антенны с рефлектором в виде плоской решетки печатных излучателей // Антенны. – 1999. – Вып. 2 (43). – С. 10-17.
44. Касьянов А.О. Двухзеркальная антенна Кассегрена на основе решеток печатных элементов. // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 17-22.
45. Касьянов А.О. Конструктивный синтез печатного фазокорректирующего твист-рефлектора с улучшенными характеристиками. // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 30-38.
46. Касьянов А.О., Саплин П.П., Суматохин К.В. Разработка высокотехнологичной свернутой зеркальной антенны на основе дифракционных решеток печатных элементов // Антенны. – 2012. – Вып. 9 (184). – С. 90-96.
47. Касьянов А.О. Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.
48. Rubin V.J., Bertoni H.L. Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation // IEEE Trans. – 1983. – Vol. AP-31, No. 6. – P. 829-836.
49. Касьянов А.О., Обуховец В.А., Суматохин К.В. Управляемые твист-рефлекторы на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток // Антенны. – 2013. – Вып. 10 (197). – С. 29-36.
50. Касьянов А.О., Суматохин К.В., Ильин И.В. Реконфигурируемый микроволновый модуль цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией на основе микрополосковой отражательной антенной решетки // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 8. – С. 101-109.
51. Касьянов А.О. Численное исследование металлodieлектрических частотно-избирательных решеток с печатными и апертурными элементами // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – Т. 15, № 5. – С. 47-55.
52. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Потенциальные возможности и области применения полосковых решеток // Антенны. – 2011. – № 6 (169). – С. 3-15.
53. Kasyanov A.O. The polarizing properties of periodic printed reflectarrays from the elements of the complicated shape // Proceedings ESA WPP-185 24-th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, 30 May - 1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
54. Чулков В.И. Математическое моделирование многослойных поляризаторов на меандровых линиях // Радиотехника. – 1994. – № 9. – С. 71-75.
55. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Расчет и экспериментальное исследование многофункционального обтекателя судовой антенны // Научно-технический журнал НТОРЭС им. А.С. Попова «Радиотехника». – 2004. – № 4. – С. 51-56.
56. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Разработка микрополосковых отражательных антенных решеток для фокусировки и поляризационной фильтрации на СВЧ // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 4. – С. 27-33.
57. Обуховец В.А., Касьянов А.О., Загоровский В.И. Электродинамический анализ многослойных микрополосковых отражательных антенных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 4-11.

REFERENCES

1. *Lobov G.D.* Ustroystva pervichnoy obrabotki mikrovolnovykh signalov: Fizicheskie printsipy. Analiz i sintez. Primeneniya [Devices for primary processing of microwave signals: Physical principles. Analysis and synthesis. Applications]. Moscow: Izd-vo MEI, 1990, 255 p.
2. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Raschet i eksperimental'noe issledovanie mnogofunktsional'nogo obtekatel'ya sudovoy anteny [Calculation and experimental study of a multifunctional fairing of a ship antenna], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2004, No. 4, pp. 51-56.
3. *Kas'yanov A.O.* Chastotno-izbiratel'nyy antennoy obtekatel' na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok i perforirovannykh ekranov [Frequency-selective antenna fairing based on metal-dielectric diffraction gratings and perforated screens], *Antenny* [Antennas], 2021, No. 3, pp. 39-49.
4. *Kas'yanov A.O.* Antennoy obtekatel' s uglovoy fil'tratsiey na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Antenna fairing with angular filtration based on metal-dielectric diffraction gratings], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2021, Vol. 85, No. 7, pp. 70-79.
5. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Prostranstvennyye polarizatsionnye fil'try, preobrazovately i manipulyatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Spatial polarization filters, converters and manipulators based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 7, pp. 43-51.
6. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Intellektual'nye radioelektronnye pokrytiya. Sovremennoe sostoyanie i problemy. Obzor [Intelligent electronic coatings. Current state and problems. Overview], *Antenny* [Antennas], 2001, No. 4 (50), pp. 4-11.
7. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Otrazhatel'nye antennoye reshetki kak mikrovolnovye komponenty intellektual'nykh pokrytiy [Reflective antenna arrays as microwave components of intelligent coatings], *Antenny* [Antennas], 2001, No. 4 (50), pp. 12-16.
8. *Bratchikov A.N.* SVCh-ustroystva, izluchately i FAR na osnove novykh metamaterialov i struktur [Microwave devices, emitters and headlights based on new metamaterials and structures] *Antenny* [Antennas], 2009, No. 1 (140), pp. 1-71.
9. *Zouhdi S., Coueñon G.E., Fourier-Lamer A.* Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, June 1999, Vol. 47, No. 6, pp. 1061-1065.
10. *Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O.* Mikropoloskovyye otrazhatel'nye antennoye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovaniye [Microstrip reflective antenna arrays. Design methods and numerical modeling]. Moscow: Radiotekhnika. 2006, 240 p.
11. *Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N.* Primeneniye pechatnykh otrazhatel'nykh reshetok dlya sozdaniya mikrovolnovykh linz s uluchshennymi kharakteristikami [The use of printed reflective gratings to create microwave lenses with improved characteristics], *Antenny* [Antennas], 2018, No. 8, pp. 17 -23.
12. *Kas'yanov A.O.* Tvist-polyarizatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Twist polarizers based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 5 (60), pp. 34-39.
13. *Kas'yanov A.O., Saplin P.P.* Svernutaya linzovaya antenna MMV-diapazona na osnove shiroko-polosnykh mikropoloskovykh OAR [Rolled-up lens antenna of the MMV-band based on broadband microstrip OAR], *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Scientific and technical collection "General issues of radio electronics"]. Rostov-on-Don: Izd-vo FGUP «RNIIRS», 2012, pp. 13-18.
14. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Upravlenie tokami v mikropoloskovoy antennoy reshetke s nagruzhennymi elementami [Control of currents in a microstrip antenna array with loaded elements], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1995, No. 12, pp. 32-36.
15. *Kas'yanov A.O.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and applications: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
16. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zakovorotnyy S.I.* Rasshirenie funktsiy ploskogo fazokorrektiruyushchego reflektora pri vkl'yuchenii impedansnykh nagruzok [Expansion of the functions of a flat phase-correcting reflector when switching on impedance loads], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2006, No. 2, pp. 60-64.

17. *Kas'yanov A.O.* Modeling of the Microstrip-Stubs Reflectarrays with the Digital Control of Scattering Characteristics at Microwaves, *Proc. of the 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, 31 May – 3 June 2005, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*, pp. 467-474.
18. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Kitayskiy M.S.* Matematicheskaya model' mikro-poloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki kombinirovannykh izluchateley [Mathematical model of a microstrip reflective antenna array of combined emitters], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2009, Vol. 14, No. 5, pp. 56-65.
19. *Kas'yanov A.O. i dr.* Razrabotka i primeneniye kompozitnykh materialov s trebuemyimi svoystvami: monografiya [Development and application of composite materials with the required properties: monograph], ed. by M.Yu. Zvezdinoy. Novosibirsk: Izd. ANS «Si-bAK», 2016, 198 p.
20. *Kas'yanov A.O., Mushnikov V.V., Obukhovets V.A.* Kharakteristiki napravlenosti konechnykh mnogoelementnykh ploskikh mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Directional characteristics of finite multi-element flat microstrip reflective antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2008, No. 11, pp. 64-72.
21. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zagorovskiy V.I.* Chislennoe modelirovaniye mikropoloskovoy fazirovannoy antennoy reshetki [Numerical modeling of a microstrip phased antenna array], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal NTORES A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of NTORES A.S. Popov "Radio Engineering"], 2002, No. 12, pp. 57-64.
22. *Kas'yanov A.O.* Dvukhzerkal'naya antenna Kassegrena na osnove reshetok pechatnykh elementov [A two-mirror Cassegrain antenna based on arrays of printed elements], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 17-22.
23. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Osnovnyye oblasti primeneniya [Frequency-selective surfaces. Main application areas], *Antenny* [Antennas], 2005, Issue 9 (100), pp. 4-12.
24. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Elektrodinamicheskoye modelirovaniye i konstruktivnyy sintez planarnykh chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey [Electrodynamical modeling and constructive synthesis of planar frequency-selective surfaces], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 24-32.
25. *Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O., Zagorovskiy V.I.* Analiz chastotno-selektivnykh struktur s elementami slozhnoy formy [Analysis of frequency-selective structures with elements of complex shape], *11th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2001), 10-14 Sept. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2001*, pp. 368-370.
26. *Khitrov Yu.A.* Kommutiruemaya mikropoloskovaya antenna [Switched microstrip antenna], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal NTORES A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of NTORES A.S. Popov "Radio Engineering"], 1992, No. 3, pp. 62-65.
27. *Guo Y.J., Barton S.K.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, Vol. AP-43, No. 4, pp. 350-355.
28. *Obukhovets V.A.* Problemy konstruktivnogo sinteza otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Problems of constructive synthesis of reflective antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 1997, Issue 2 (39), pp. 17-24.
29. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti i polarizatsionnye modulyatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Frequency-selective surfaces and polarization modulators based on microstrip diffraction gratings], *Mater. 8-y mezhdunarodnoy krymskoy konferentsii «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii», 14-17 sentyabrya 1998, Sevastopol'* [Proceedings of the 8th International Crimean Conference "Microwave technology and telecommunication technologies", September 14-17, 1998, Sevastopol']. Vol. 2, pp. 451-453.
30. *Kas'yanov A.O.* Kharakteristiki rasseyaniya mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok s impedansnymi vklyucheniymi [Scattering characteristics of microstrip reflective antenna arrays with impedance inclusions], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 4 (59), pp. 23-28.
31. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zagorovskiy V.I., Mel'nikov S.Yu.* Kompleks programm po proektirovaniyu otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [A set of programs for the design of reflective antenna arrays], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2002, Issue 1, pp. 9-12.

32. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey s fraktal'nymi elementami [Numerical study of frequency-selective surfaces with fractal elements], *Antenny* [Antennas], 2005, Issue 9 (100), pp. 13-19.
33. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya mikropoloskovy-shtyrevoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Results of numerical simulation of a microstrip-pin reflective antenna array], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 4-9.
34. Kas'yanov A.O., Kitayskiy M.S. Rezul'taty chislennogo issledovaniya ploskoy rektennoy reshetki pechatnykh kombinirovannykh elementov [Results of a numerical study of a flat rectal lattice of printed combined elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 1 (102), pp. 204-208.
35. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey s fraktal'nymi elementami [Numerical study of frequency-selective surfaces with fractal elements], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 13-19.
36. Kas'yanov A.O. Volnovodnoe modelirovanie chastotno-selektivnykh struktur na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Waveguide modeling of frequency-selective structures based on microstrip diffraction gratings], *Mezhdovedomstvennyy sbornik nauchnykh statey «Rasseyaniye elektromagnitnykh voln»* [Interdepartmental collection of scientific articles "Scattering of electromagnetic waves"], 2003, Issue 12, pp. 121-127.
37. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie metallodielektricheskikh chastotno-izbiratel'nykh reshetok s pechatnymi i aperturnymi elementami [Numerical study of metal-dielectric frequency-selective gratings with printed and aperture elements], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2010, Vol. 15, No. 5, pp. 47-55.
38. Kas'yanov A.O. The radiating properties of spiraphase reflector based on microstrip array, *Proceeding of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'99), Sevastopol, 1999*, pp. 328-330.
39. Kas'yanov A.O. Analiz mikropoloskovoy fazirovannoy antennoy reshetki [Analysis of microstrip phased array antenna array], *Naukovi Visti* [Scientific News], 2001, No. 4 (18), pp. 25-33.
40. Kump D.G., Himdi M., Rudberg A. Design of an unequally spaced reflectarray, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2000, Vol. 2.
41. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Rasseyaniye voln periodicheskoy reshetkoy s passivnymi nagruzkami [Scattering of waves by a periodic lattice with passive loads], *Sb. "Rasseyaniye elektromagnitnykh voln"* [Collection "Scattering of electromagnetic waves"]. Taganrog: TRTI, 1987, Issue 6, pp. 19-25.
42. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
43. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Konstruktivnyy sintez zerkal'noy anteny s reflektorom v vide ploskoy reshetki pechatnykh izluchateley [Constructive synthesis of a mirror antenna with a reflector in the form of a flat array of printed emitters], *Antenny* [Antennas], 1999, Issue 2 (43), pp. 10-17.
44. Kas'yanov A.O. Dvukhzerkal'naya antenna Kassegrana na osnove reshetok pechatnykh elementov [A two-mirror Cassegrain antenna based on arrays of printed elements], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 17-22.
45. Kas'yanov A.O. Konstruktivnyy sintez pechatnogo fazokorrektiruyushchego tvist-reflektora s uluchshennymi kharakteristikami [Constructive synthesis of a printed phase-correcting twist reflector with improved characteristics], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2011, No. 9, pp. 30-38.
46. Kas'yanov A.O., Saplin P.P., Sumatokhin K.V. Razrabotka vysokotekhnologichnoy svernutoy zerkal'noy anteny na osnove difraktsionnykh reshetok pechatnykh elementov [Development of a high-tech folded mirror antenna based on diffraction gratings of printed elements], *Antenny* [Antennas], 2012, Issue 9 (184), pp. 90-96.
47. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
48. Rubin B.J., Bertoni H.L. Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation, *IEEE Trans.*, 1983, Vol. AP-31, No. 6, pp. 829-836.

49. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Sumatokhin K.V. Upravlyaemye tvist-reflektory na osnove rekonfiguriruemyykh mikropoloskovyykh reshetok [Controlled twist reflectors based on reconfigurable microstrip arrays], *Antenny* [Antennas], 2013, Issue 10 (197), pp. 29-36.
50. Kas'yanov A.O., Sumatokhin K.V., Il'in I.V. Rekonfiguriruemyy mikrovolnovyy modul' tsifrovogo upravlyаемого radioelektronnogo pokrytiya s prostranstvenno-vremennoy adresatsiey na osnove mikropoloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Reconfigurable microwave module of a digital controlled radioelectronic coating with spatio-temporal addressing based on a microstrip reflective antenna array], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2013, No. 8, pp. 101-109.
51. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie metallodielektricheskikh chastotno-izbiratel'nykh reshetok s pechatnymi i aperturnymi elementami [Numerical study of metal-dielectric frequency-selective gratings with printed and aperture elements], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2010, Vol. 15, No. 5, pp. 47-55.
52. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O. Potentsial'nye vozmozhnosti i oblasti primeneniya poloskovyykh reshetok [Potential possibilities and applications of strip arrays], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 6 (169), pp. 3 -15.
53. Kasyanov A.O. The polarizing properties of periodic printed reflectarrays from the elements of the complicated shape, *Proceedings ESA WPP-185 24-th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, 30 May - 1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
54. Chulkov V.I. Matematicheskoe modelirovanie mnogosloynnykh polarizatorov na meandrovyykh liniyakh [Mathematical modeling of multilayer polarizers on meander lines], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1994, No. 9, pp. 71-75.
55. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Raschet i eksperimental'noe issledovanie mnogofunktsional'nogo obtekatel'ya sudovoy anteny [Calculation and experimental study of a multifunctional fairing of a ship antenna], *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal NTORES im. A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of the A.S. Popov NTORES "Radio Engineering"], 2004, No. 4, pp. 51-56.
56. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Razrabotka mikropoloskovyykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok dlya fokusirovki i polarizatsionnoy fil'tratsii na SVCh [Development of microstrip reflective antenna arrays for focusing and polarization filtering on microwave], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2006, No. 4, pp. 27-33.
57. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O., Zagorovskiy V.I. Elektrodinamicheskyy analiz mnogosloynnykh mikropoloskovyykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Electrodynamic analysis of multilayer microstrip reflective antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 4 (59), pp. 4-11.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

Kasyanov Alexander Olegovich – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 658.512.2.011.5

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74

В.В. Лисяк

ОБЗОР СЛАЙСЕРОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Представлен обзор программного обеспечения (ПО) для подготовки трёхмерных моделей (3D-моделей) объектов различного назначения к передаче на 3D-принтер для печати. Отмечается, что в последнее время 3D-печать является неотъемлемой частью аддитивного производственного процесса. Указывается, что для выполнения процесса 3D-печати, созданные или загруженные 3D-модели, хранящиеся в STL-файлах, должны быть транслированы в язык управления принтером. Такой язык называется G-кодом, а программы, позволяющие его получить, называются слайсерами. Отмечается, что основной функцией

слайсера является нарезка модели объекта на отдельные слои. В статье рассматривается обзор программ-слайсеров различных производителей. Для каждого слайсера приводятся характеристики, отражающие его функциональную наполненность, ориентацию на определённую категорию пользователей, ценовую доступность, поддержку другого ПО и другие характеристики. Отмечается, что известны два вида слайсеров – универсальные и специализированные. Специализированные слайсеры ориентированы, обычно, на одну технологию или на одну модельную линейку принтеров, а универсальные слайсеры ориентированы на широкую номенклатуру принтеров. Указывается, что в последние годы производители стали создавать ПО, которое совмещает процессы разработки модели и его трансляцию в G-код. Отмечается, что процесс 3D-печати требует предварительного задания многих настроек параметров, участвующих в процессе печати программно-аппаратных средств. Приведённый обзор показывает, что практически все слайсеры, кроме ядра программы, реализующего расчёты геометрических форм и конвертацию модели в G-код, имеют шесть стандартных блоков настроек: для слайсера, модели, принтера, материала, дополнительных сервисов и нарезки. Приводятся параметры настройки для каждого из блоков настройки. Рассмотренные в статье программы-слайсеры отобраны с учётом ориентации на разные группы пользователей, их современной функциональной наполненности, популярности и доступности на российском рынке.

3D-моделирование; 3D-графика; STL-файлы; экструдер; профиль печати; G-код; 3D-принтер; прототипирование; слайсер.

V.V. Lisyak

OVERVIEW OF 3D PRINTING SLICERS

The article presents an overview of software for preparing three-dimensional models (3D models) of objects for various purposes for transfer to a 3D printer for printing. It is noted that recently 3D printing is an integral part of the additive manufacturing process. Specifies that in order to perform the 3D printing process, created or downloaded 3D models stored in STL files must be translated into the printer control language. Such a language is called G-code, and the programs that make it possible are called slicers. It is noted that the main function of the slicer is cutting the object model into separate layers. The article discusses an overview of slicer programs from various manufacturers. For each slicer, characteristics are given that reflect its functional content, focus on a certain category of users, affordability, support for other software, and other characteristics. It is noted that two types of slicers are known - universal and specialized. Specialized slicers are usually focused on one technology or one model line of printers, while universal slicers are focused on a wide range of printers. It is indicated that in recent years, manufacturers have begun to create software that combines the processes of model development and its translation into G-code. It is noted that the 3D printing process requires the preliminary setting of many parameter settings involved in the process of printing software and hardware. The above review shows that almost all slicers, except for the core of the program that calculates geometric shapes and converts the model to G-code, have six standard settings blocks: for slicer, model, printer, material, additional services and cutting. The tuning parameters for each of the tuning blocks are given. The slicer programs considered in the article are selected taking into account the orientation towards different user groups, their modern functional content, popularity and availability on the Russian market.

3D modeling; 3D graphics; STL files; extruder; print profile; G-code; 3D printer; prototyping; slicer.

Введение. При подготовке материала статьи авторы пользовались источниками информации [1–20].

Слайсер (англ. Slice – срез) – компьютерная программа, которая преобразует виртуальную 3D-модель объекта в машинный код (G-код) для управления печатью, в частности, 3D-принтером.

При формировании объекта (детали) применяется послойная или поверхностная технология. С учётом этого G-код должен содержать информацию о способах создания слоёв, которая, как правило, включает данные о векторных линиях, растровых плашек, путей перемещения и другие управляющие данные.

Любую поверхность можно представить множеством многоугольников без их пересечений и, так называемых, «дыр». Применительно к 3D-печати это эквивалентно утверждению, что любую модель можно напечатать, представив её множеством слоёв.

Далее будет рассмотрено несколько известных слайсеров, с помощью которых выполняется печать объектов, используя наиболее распространённую в настоящее время технологию печати методом послойного наплавления (англ. fused deposition modeling, FDM).

Известны два вида слайсеров – универсальные и специализированные. Специализированные слайсеры ориентированы, обычно, на одну технологию или одну модельную линейку принтеров. Соответственно для универсальных слайсеров характерна ориентация на применение широкой номенклатуры совместимых устройств. Одни производители выбирают универсальные слайсеры и дополняют их профилями своего оборудования. Другие – предпочитают специализированное ПО под своё оборудование. Если производитель продаёт принтер вместе со слайсером – значит, что он содержит необходимые профили и настройки.

Для пользователей нового 3D-оборудования лучше не торопиться использовать сторонние слайсеры, несмотря на их популярность. Это объясняется несколькими причинами.

Придётся для корректной работы принтера с программой прописать ряд специфических параметров, что не совсем просто.

Приобретённые вместе со слайсером «плюсы» могут оказаться ненужными для ваших задач.

Принципы работы и результаты работы слайсеров у всех программ нарезки во многом похожи.

Поэтому эффективней сначала научиться уверенно пользоваться штатным слайсером, после чего начинать тестировать сторонние программы.

Для пользователя важной характеристикой слайсера является его ценовая доступность, что делит слайсеры на платные и бесплатные. В настоящее время в FDM технологии универсальной платной программой возможно осталась только Simplify3D.

Обзор программ-слайсеров. Процесс 3D-печати требует предварительного задания многих настроек параметров, участвующих в процессе печати программно-аппаратных средств. Поэтому практически все разработчики предпринимают попытки наиболее удобным и понятным образом для пользователей их структурировать и выстроить взаимосвязи между основными блоками настроек, которые связаны с 3D-принтером, моделью объекта, используемого при печати материала, экструдерами, профилями печати и с дополнительными опциями. При этом разные разработчики в процессе структурирования настроек видят разные отправные точки.

Вместе с тем практически все слайсеры, кроме ядра программы, реализующего расчёты геометрических форм и конвертацию модели в G-код, имеют шесть стандартных блоков настроек.

1. Блок настройки слайсера. Настройка параметров слайсера – процедура творческого характера разработчика, дизайнера и специалиста по графическим интерфейсам. Однако, как правило, в интерфейсе программы при должном терпении можно всегда найти:

- ◆ выбор языка программы;
- ◆ выбор необходимых и достаточных настроек;
- ◆ выбор цветовой гаммы оформления;
- ◆ выбор предпочтительных действий
- ◆ и другие параметры настройки.

Перечисленные настройки на качество печати практически не оказывают влияние, но способствуют пользователю правильно указывать единицы измерения, отображение модели, скорости соединения портов и другие полезные опции.

2. Блок настройки принтера. Такие настройки параметров относятся не только к «железу» принтера, но и к его электронике.

Штатные версии слайсеров позволяют выбрать только модель принтера, а универсальные версии – указать язык G-code, который понимает принтер, настроить скорости перемещения, jerk-эффектов, откатов нити, что позволяет более точно рассчитывать время печати.

При настройке механики принтера необходимо будет указать тип механической системы перемещения, размеры зоны печати, отступы от краёв, количество экструдеров, диаметр сопла, максимальную температуру наконечника.

3. Блок настройки материала. Настраивается диаметр используемой нити, температура, при которой нить плавится, плотность материала, производитель и цена материала и некоторые другие настройки.

4. Блок настройки модели. В этом блоке указываются инструменты масштабирования и позиционирования модели в рабочей зоне, а также её «ремонта» и модификации.

5. Блок настройки нарезки регламентирует и основные инструменты и параметры при создании детали из модели, а также дополнительные инструменты (поддержки, стены, башни, плиты и сервисные операции).

6. Блок настройки дополнительных сервисов предназначен для настройки последовательности команд (скрипты, макросы).

Таким образом, для понимания основных особенностей программного обеспечения всех слайсеров, в том числе рассмотренных в предлагаемом обзоре, указано, что кроме ядра программы, реализующего расчёты геометрических форм и конвертацию модели в G-код, имеется шесть стандартных блоков настроек. Фактически от того какой функционал заложен в каждый из перечисленных блоков во многом зависит ориентация программы на ту или иную категорию пользователей, её доступность и популярность.

Перейдём непосредственно к обзору программ-слайсеров, среди которых отсутствуют программные продукты России, так как являются предметом отдельной публикации.

ASTROPRINT.

Производитель: 3DAGoGo Inc., США, Сан-Диего,

Сайт: astroprint.com/

Приложение AstroPrint – облачная платформа 3D-печати, разработанное частной компанией из Сан-Диего (США), которая создаёт ПО для управления 3D-принтерами с любого веб-устройства без каких-либо технических знаний.

При использовании программы Astroprint передача G-кода в 3D-принтер выполняется специальной программой – Astrobox, которая может контролировать принтер с любого устройства, подключенного к сети Интернет.

При отсутствии у пользователя своей 3D-модели или отсутствует необходимость её создания, то он может загрузить модель из какого либо сервиса, например из Yeggi или из репозитория CGTrader и Thingiverse. При разработке собственной трёхмерной модели можно воспользоваться средствами моделирования 3D Slash и Leopoly. При этом распечатать свои файлы можно с помощью i.materialise, где компания Shanghai DM 3D Technology Co., Ltd предоставляет свои услуги по 3D-печати. Компания имеет десятки промышленных 3D-принтеров SLA, сотни настольных 3D-принтеров FDM и несколько металлических 3D-принтеров с возможностью выполнения печати разнообразными пластиками, смолами и металлическими сплавами.

ПО приложения достаточно простое. В наиболее лёгком варианте пользователь может задать только материал и требуемое качество печати, а для сложных случаев в приложении имеется ряд инструментов для более профессиональных действий пользователя.

Положительным моментом приложения является возможность его интеграции с другими сервисами, упрощающими пользователю 3D-моделирование и печать.

Среди недостатков можно отметить, что наряду с удобной нарезкой на слои, пользователи отмечают недостаточность контроля процесса печати, предоставляемого другими слайсерами. Вместе с тем AstroPrint хорошее приложение для начинающих пользователей.

Программа бесплатная\платная с поддержкой Raspberry Pi, pcDuino, браузер.

CRAFTWARE.

*Производитель: Craftware Sp., Польша, Warszawa,
Сайт: craftware.com/*

Craftware Sp. – предприятие, с центральным офисом в Варшаве. Работает в сфере проектирования компьютерных систем и услуг. Основано в 2009 г.

Слайсер CraftWare является бесплатной программой, конкурирующей с функционально похожими слайсерами со стоимостью 120–150 долларов. Программа имеет дружелюбный интерфейс, обеспечивающий возможность полного контроля настроек 3D-печати и совместимость практически с любыми 3D-принтерами, работающими по технологиям FDM и FFF.

Функциональная наполненность CraftWare позволяет реализовать:

- ◆ интерактивное управление печатью, сокращающее время печати;
- ◆ контролировать слои под произвольными углами обзора;
- ◆ оптимизацию траектории движения рабочего механизма принтера;
- ◆ редактирование 3D-модели (повороты, масштаб, копирование и другие).

Положительными моментами слайсера являются:

- ◆ продуманный, удобный интерфейс, который, как отмечают пользователи, вполне конкурентно способный с платными программами типа Simplify3D;
- ◆ популярность программы у пользователей, желающих иметь слайсер, аналогичный Simplify3D, но бесплатно.

Недостаток слайсера связан с невысоким качеством печати в сравнении с программами Cura и Simplify3D.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

CURA.

*Производитель: Ultimaker, Нидерланды
Сайт: ultimaker.com/software/ultimaker-cura*

Ultimaker – компания по производству 3D-принтеров, ПО и фирменные материалы для 3D-печати. Базируется в Нидерландах с офисами в США.

Программа Cura разработана фирмой Ultimaker, которая имеет свои корни в Open Source. Поэтому ПО для 3D-принтеров получилось, как бесплатный слайсер, который и в настоящее время остаётся бесплатным. В последние годы компания дополнила профили для 3D-принтеров, производимые другими компаниями.

Слайсер Cura предоставляет пользователям следующие возможности:

- ◆ поддержка нескольких основных форматов (STL, 3MF и OBJ);
- ◆ визуализация движения рабочего блока и отражение времени печати.
- ◆ поставка обновлений для программы;
- ◆ предоставление пользователям возможности разработки своих программных модулей (плагинов) для включения их в основную программу

Плагины, обычно, создаются для расширения функциональных возможностей программы и реализуются как библиотеки общего пользования.

Положительными моментами программы являются:

- ◆ ориентация как на новичков, так и на экспертов, при этом новичков доступны только самые важные настройки;
- ◆ многочисленный (около 200) инструментарий настроек;
- ◆ доступность использования в печати нескольких материалов;
- ◆ относительно быстрая обработка слайсером объёмных файлов STL;
- ◆ хорошие (правда не отличные) результаты.

В качестве минуса отмечается относительно большой (10–20)% разброс в оценке времени печати.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

ICESL.

Производитель: Нанси, Франция

Сайт: <https://icesl.loria.fr>

IceSL – современная, бесплатная программа с расширенными возможностями, включающая несколько модулей и позволяющая выполнять моделирование как OpenSCAD в Lua, т. е. IceSL является многофункциональной программой. При этом вместе с клиентскими версиями для настольных компьютеров допускается использование некоторых функций онлайн.

Среди особенностей IceSL можно выделить:

- ◆ возможность редактирования полигональных сеток в Lua-коде;
- ◆ просмотр изменений модели в режиме реального времени;
- ◆ возможность предотвращать потёки во время печати;
- ◆ возможность отображения G-кода для каждого слоя.

Для пользователей программы интересной особенностью является доступность изменения настроек для каждого слоя, что позволяет реализовать адаптивный режим нарезки, когда настройки слоя формируются на основе печатаемого объекта. Некоторые слайсеры других производителей тоже допускают возможность послойных настроек, но при этом требуют дополнительных действий в программе CAD, что например реализовано в слайсере Slic3r.

Слайсер рассчитан на продвинутых пользователей, которые отмечают его высокий уровень контроля.

К недостатку программы относится её недоступность для macOS.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

IDEAMAKER.

Производитель: Raise3D, Китай, Шанхай с офисом в США и Европе

Сайт: raise3d.ru/news/raise3d-vypustili-novuyu-versiyu-ideamaker-4-0/

Компания Raise3D основана в 2012 г. в Шанхае. Сегодня имеет офисы в США и Европе, производит 3D-принтеры и является разработчиком слайсера ideaMaker. Слайсер разработан под 3D-принтеры Raise3D и является бесплатным. Программа позволяет быстро создать файлы для печати и позволяет работать с продвинутыми функциями настройки. Имеются такие полезные для пользователя функции, как лечение, совмещение, разрезание моделей и их поддержка добавлением (удалением) столбиков.

Слайсер имеет 64-битный движок, что существенно ускоряет расчёт сложных моделей. Кроме этого, программа допускает разделение моделей на группы, что является интересной особенностью слайсера.

Программа поддерживает большинство FDM и FFF-принтеров и фактически является платформой, позволяющей отслеживать несколько профилей печати и удалённо управлять заданием. Сегодня существует облачная версия RaiseCloud, позволяющая управлять и контролировать печать одновременно нескольких принтеров Raise3D.

Положительной стороной слайсера является простота его эксплуатации, что привлекает начинающих пользователей. Однако популярность слайсера не так высока, как у других подобных программ, поэтому он имеет небольшое сообщество пользователей.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

KISSLICER.

Производитель: Raise3D, Kumaï

Сайт: 3d-m.ru/programmnoe-obespechenie-kisslicer-pro/

KISSlicer можно прочесть как Keep It Simple Slicer (Будь проще), что, вероятно, и определяет название слайсера. Выпущены платная и бесплатная версии программы. Бесплатная версия отличается возможностью печати только с одним экструдером и невозможностью регулировать параметры из командной строки, но для новичка в ней достаточно функций. В профессиональной версии используются расширенные настройки, допускается использование нескольких экструдеров и возможность объединения нескольких файлов STL в одну печать. Среди особенностей программы можно выделить следующие:

- ◆ высокая скорость нарезки;
- ◆ возможность управления скоростью принтера;
- ◆ наличие интеллектуального контроля температуры;
- ◆ возможность использования адаптивной поддержки;
- ◆ удобный интерфейс и повышенное качество печати.

Преимуществом программы KISSlicer является её мультиплатформенность, обеспечивающая работу с WIN, Linux, MACOS, что придаёт ей универсальность и возможность применения почти для всех моделей 3D-принтеров.

Недостатком программы является ручная адаптация слайсера, если потребуется G-код для принтера, которого нет в списке программы..

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux, Raspberry Pi

MAKERBOT PRINT.

Производитель: MakerBot – подразделение Stratasys Ltd., Израиль, Реховот

Сайт: makerbot.com/3d-printers/apps/makerbot-print/

Компания Stratasys, Ltd. представляет американо-израильского производителя 3D-принтеров и систем цифрового производства. Компания зарегистрирована в Израиле, её подразделение MakerBot разрабатывает ПО по профилю компании.

Программа MakerBot Print разработана для линейки 3D-принтеров MakerBot. Отличительной особенностью программы является используемый в ней алгоритм, позволяющий выполнять автоматическую настройку параметров для конкретного режима печати и типа экструдера. Кроме этого, функциональная наполненность слайсера предоставляет:

- ◆ возможность расстановки сеток в автоматическом режиме;
- ◆ обеспечение доступа и распечатки объектов Thingiverse;
- ◆ возможность контролировать 3D-принтер посредством веб-камеры.

Программа ориентирована на начинающих и продвинутых пользователей.

Положительным моментом программы является обеспечение максимального качества печати на принтере MakerBot и простота её использования.

Недостаток программы связан с использованием принтера другого производителя, когда необходимо изучить новое ПО.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

MATTERCONTROL.

Производитель: MatterHackers, Inc., США, Калифорния
Сайт: matterhackers.com/store/l/mattercontrol/sk/MKZGTDW6

MatterControl – современная, бесплатная программа с расширенными возможностями, включающая несколько модулей и позволяющая выполнять моделирование. MatterControl является многофункциональной программой, позволяющей выполнить весь процесс 3D-печати от нуля до готовой печатной модели, не выходя из программы. Исходная разработка программы велась как ПО для хост-принтера. Как правило, программа функционирует в паре с принтером, но есть возможность сохранить файл G-кода на SD-карте.

Интерфейс программы, несмотря на внесение многочисленных изменений, имеет для пользователя удобную структуру. На экране панель примитивов с развитым набором инструментов, которые упрощают процесс моделирования.

Можно использовать стандартный или расширенный режим работы с программой. Стандартный режим позволяет настраивать толщину слоя и сохранять её для последующей печати. Расширенный режим позволяет настроить автоматическое восстановление сетки, использование нескольких экструдеров и возможность просмотра каждого слоя в процессе печати.

Программа ориентирована на новичков и опытных пользователей.

Положительной особенностью программы является облачное хранение проектов. Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

PRUSASLICER.

Производитель: Prusa Research, Чехия, Прага
Сайт: 3deshnik.ru/blogs/dark184/prusaslicer-nachalo

Компания Prusa Research была основана в 2012 году как стартап из одного человека Йозефом Прусой. Сегодня компания разрабатывает собственное оборудование и программное обеспечение.

До 2019 г. программа PrusaSlicer называлась Slic3r Prusa Edition, после чего компания внесла много расширенных функций и настроек. После этого слайсер PrusaSlicer завоевал своё место среди лидеров по производству программ для 3D-принтеров FDM и SLA/DLP. Программа имеет открытый исходный код, что открывает возможность создания собственных плагинов и их адаптации к новым функциям.

Слайсер имеет три пользовательских режима, поэтому он подходит для разных категорий пользователей. Для новичков доступны только основные настройки. Для продвинутых пользователей и профессионалов доступен широкий спектр настроек принтеров. Пользовательский интерфейс имеет удобную навигацию и даёт пользователю возможность восстановления моделей и высокую точность в оценке времени печати, особенно для собственных принтеров Prusa.

Положительным моментом программы является наличие многих настроек, улучшающих печать.

Недостаток программы связан с оригинальным принтером Prusa, когда у пользователей появляется необходимость просмотра деталей печати.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

REPETIER.

*Производитель: Hot-World GmbH & Co. KG, Германия
Сайт: repetier.com/about-us/*

Компания основана в 2004 г., в 2006 г. стала называться «Hot-World GmbH & Co. KG». Среди основных видов деятельности – разработка и распространение программных продуктов.

Приложение Repetier удовлетворяет как новичков, так и продвинутых пользователей. Поддерживает до 16 экструдеров и фактически все 3D-принтеры FDM. Начало было положено разработкой Repetier-Firmware и Repetier-Host с целью повысить качество печати. Позже появился Repetier-Server для оптимизации возможностей процесса печати и его большей гибкости. Если не использовать настройки, то по умолчанию можно применять нарезки с помощью CuraEngine, Slic3r или Slic3r Prusa Edition.

Для того, чтобы получить доступ и управлять 3D-принтером через браузер компьютера или смартфона необходимо воспользоваться программой Repetier Host, которая через Repetier Server обеспечивает удалённый доступ. Repetier-Server является хорошим дополнением к Repetier-Host и позволяет:

- ◆ наблюдать за работой принтера через веб-камеру;
- ◆ одновременно управлять несколькими принтерами;
- ◆ работать на Windows, Mac и Linux;
- ◆ загрузить новую прошивку принтера.

Плюсы программы – открытый исходный код и популярность.

Минусы программы – качество печати желательно улучшить.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux, Raspberry Pi.

SELF CAD.

*Производитель: SelfCAD, США, Нью-Йорк
Сайт: <https://www.selfcad.com/>*

Программа SelfCAD – это доступное программное обеспечение для 3D-моделирования, выпущенное в 2016 году и которое может соответствовать любому уровню навыков. SelfCAD – это программа проектирования на основе полигональной сетки. Представляет собой онлайн-платформу CAD/CAM на основе браузера, которая позволяет пользователю моделировать, лепить, нарезать и печатать онлайн. Кроме того, пользователям не нужно тратить месяцы на изучение ряда сложных программ. Пользователи могут создавать и печатать объекты за гораздо меньшее время, чем при использовании традиционных программ CAD/CAM.

Программа подготавливает проекты для принтеров FDM и DLP. Имеет инструменты рисования, манифолдинга и нарезки, которые доступны в одном программном обеспечении. Magic Fix SelfCAD автоматически исправляет недостатки в проекте, чтобы избежать ошибок при печати.

Чтобы подготовить форму для 3D-печати, важно проверить каждый слой объекта с помощью инструмента для нарезки. SelfCAD позволяет пользователю делать это с помощью встроенной функции нарезки. Слайсер включает предустановленные профили, поэтому пользователи могут просто выбрать профиль, построить опорную структуру и заполнение дизайна или выбрать из многих других расширенных настроек приложения.

SelfCAD позволяет пользователям сохранять свои проекты на облачных серверах и легко делиться своими проектами с другими. SelfCAD также снижает затраты, время и усилия, связанные с перемещением больших файлов.

Плюсы программы:

- ◆ после выполнения нарезки допускается предварительный просмотр слоя;
- ◆ указывается время печати и конечный вес модели.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

SLIC3R.

Производитель: Prusa Research, Чехия, Прага

Сайт: slic3r.org/

Бесплатная программа Slic3r с открытым исходным кодом впервые вышла в 2011 г. Поддерживает многие 3D-принтеры как недорогие стартовые, так и профессиональные. Многочисленные и разнообразные функции программы удовлетворяют специалистов и профессионалов, но для новичков этот слайсер может показаться сложным.

Среди особенностей программы можно отметить следующие:

- ◆ генерация G-кода выполняется быстро. Не ждите часами, чтобы нарезать детальную модель. Slic3r примерно в 100 раз быстрее, чем Skeinforge. Он также использует многопоточность для параллельных вычислений;
- ◆ множество форматов ввода/вывода. Slic3r читает файлы STL, AMF и OBJ, а также может выводить файлы G-code и SVG;
- ◆ прохладные стратегии охлаждения. Умная логика охлаждения будет регулировать скорость вращения вентилятора и скорость печати, чтобы у каждого слоя было достаточно времени для охлаждения, прежде чем на него будет наложен следующий слой;
- ◆ возможность изменять высоту слоя;
- ◆ использование края для лучшей адгезии. Эта уникальная функция улучшает адгезию встроенной пластины, создавая базовый фланец вокруг ваших объектов, который вы можете легко удалить после печати;
- ◆ все возможности удобного интерфейса также доступны из командной строки. Это позволяет интегрировать Slic3r в вашу пользовательскую цепочку инструментов и пакетные операции по своему усмотрению.

Плюсы программы – высокая скорость работы даже на медленных компьютерах, интеграция с OctoPrint, регулирование давления и другое.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

SLICECRAFTER.

Производитель: Craftbot, Венгрия, Будапешт

Сайт: topbestalternatives.com/slicecrafter/

Компания Craftbot (ранее CraftUnique) – разработчик и производитель 3D-принтеров, а также создает прошивку и программное обеспечение для нарезки, чтобы предоставить пользователям полное решение для 3D-печати. Венгерская компания Craftbot базируется в Будапеште и была основана в 2014. Имеет дочерние компании в Канаде и США. Портфолио Craftbot ориентировано на различные потребности клиентов: от компактного настольного принтера до принтеров с двумя головками большого объема печати, предназначенных для промышленного использования.

SliceCrafter является онлайн-программой, основанной на IceSL, поэтому пользователи Mac тоже могут её использовать. Подготовка слоёв в SliceCrafter практически совпадает с IceSL, но некоторых функций IceSL нет в SliceCrafter.

CraftWare Pro идеально подходит для:

- ◆ новичков; которым нужен простой в использовании слайсер с базовыми функциями САПР, и позволяющий делать персонализированную печать хорошего качества всего за несколько щелчков мыши.

- ◆ продвинутых пользователей; которым нужны инновационные настройки, помогающие оптимизировать печать для лучшего качества и эффективности.

- ◆ экспертов, которым нужен оптимизатор печати, который может повысить эффективность за счет сокращения затрат и времени на печать и предоставить возможность поддерживать полный контроль над производственным процессом.

Плюсы программы – генерация G-кода без установки ПО 3D-слайсера.

Минусы программы – недостаток функций из настольного приложения.

Программа бесплатная с поддержкой браузера.

SIMPLIFY3D.

Производитель: Simplify 3D, США, Цинциннати

Сайт: simplify3d.com/

Simplify3D включает в себя всё необходимое для работы с 3D-принтером. Настройка модели и покрытие, нарезка и создание файлов для печати, предварительное моделирование, настраиваемые опорные конструкции, анализ и ремонт сетки, управление и мониторинг машины и многое другое.

Поддержка сотен различных 3D-принтеров. Simplify3D сотрудничает с компаниями, занимающимися 3D-печатью, в более чем 30 странах, чтобы обеспечить совместимость программного обеспечения с новейшим оборудованием для 3D-печати. По данным разработчика Simplify3D поддерживает почти 95% всех современных настольных 3D-принтеров.

Наиболее значимыми особенностями Simplify3D являются следующие.

1. Простое переключение между несколькими принтерами. Вместо того, чтобы изучать разные программы для каждого приобретаемого 3D-принтера, можно использовать одно приложение для всего своего оборудования для 3D-печати. ПО можно быстро переключать между различными конфигурациями принтеров, что позволяет всё контролировать из одного приложения.

2. Реалистичное моделирование. Simplify3D включает в себя реалистичное моделирование перед печатью, которое позволяет увидеть точные действия, которые будет выполнять 3D-принтер, прежде чем начнется печать. Можно буквально наблюдать за анимацией экструдера, укладывающего каждую отдельную линию пластика, что даёт существенный объём информации.

3. Заблаговременное выявление проблем. Моделирование включает информацию о точных скоростях, последовательностях и настройках, которые используются для печати, чтобы быстро их проверить, т.е можно использовать реалистичную симуляцию для выявления проблем до включения 3D-принтера.

4. Улучшенное качество печати и легкое удаление. Simplify3D предлагает наилучшие из доступных опор, позволяя достичь высокого уровня качества поверхности даже для самых сложных отпечатков. ПО автоматически предлагает, где следует добавить материал для дополнительных опор в нестабильных областях или удалить ненужные опоры для сокращения времени печати.

Программа платная с поддержкой Windows, Mac, Linux.

PATHIO.

Производитель: E3D, Великобритания, Оксфорд

Сайт: all3dp.com/4/pathio-slicer-e3d/

Pathio – новый слайсер с закрытым исходным кодом. В начале 2020 г. появилась бета-версия. Со слов разработчиков, они сконцентрированы на абсолютно новом механизме нарезки. Обычно быстро выполняется нарезка модели на

2D-слайсы, а потом решаются вопросы реализации слайсов по отношению к оболочке и заполнению. В отличие от такого подхода, слайсер Pathio работает в 3D-пространстве, что способствует получению правильной толщины стенок и увеличения самонесущих геометрий.

В Pathio реализована возможность группировать детали и для каждой группы создавать свои настройки. Разработчики предполагают реализовать облачную синхронизацию между принтерами.

Особенности, на которые стоит обратить внимание.

1. Пользовательский интерфейс. С точки зрения работы и возможностей Pathio можно сравнить с Simplify3D, который дает пользователям возможность настроить несколько процессов печати для разных экструдеров и моделей. Команда Pathio разработала пользовательский интерфейс, который упрощает работу. Теперь фактически есть дерево функций, которое содержит все модели, и можно объединять модели в группы и задавать настройки для каждой группы.

2. 3D смещение. Pathio вычисляет истинное 3D-смещение для определения оболочки и заполнения, создавая самонесущую геометрию оболочки без зазоров и отверстий. При этом оболочка становится более стабильной к механике: углы усилены, а оболочки на наклонных поверхностях имеют постоянную толщину.

3. Рисование – это новый способ определения того, где на модели размещаются опоры. Более интуитивно понятный, чем добавление сеток-модификаторов, и менее утомительный, чем многократные щелчки левой кнопкой мыши по опорным столбам, Рисование позволяет выбрать именно то место, где пользователь хочет разместить опоры, быстрым и простым способом.

4. Создана вкладка «Избранное», позволяющая сохранить наиболее часто используемые настройки на переднем плане для быстрой настройки печати. Эта функция, видимая, но не настраиваемая и указывает на персонализацию, которую Pathio вводит в нарезку.

5. Основы нарезки претерпели изменения. Вместо того, чтобы анализировать модель с накоплением 2D-модулей с двумерными значениями оболочек в соответствующих срезах, в качестве переменной используется универсальная толщина оболочки. На основе заданного значения Pathio создает оболочку равномерно по всем измерениям, что, например, устраняет возможность появления зазоров в верхних слоях. Такой подход гарантирует, что поверхностные слои не останутся без поддержки из-за недостаточного заполнения.

О реальных плюсах и минусах программы говорить рано.

Программа бесплатная\платная с поддержкой Windows, Mac, OSX.

OCTOPRINT.

Производитель: Patreon, США, Калифорния

Сайт: <https://octoprint.org/>

OctoPrint – бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом. OctoPrint совместим с большинством доступных потребительских 3D-принтеров, а его мощная система плагинов позволяет различными способами расширять его функциональность, среди которой следующие возможности:

- ◆ создание с помощью Octolapse таймлапсов – фотосъемки длительно текущих процессов для достаточно быстрого просмотра на экране;
- ◆ полный контроль оформления пользовательского интерфейса OctoPrint с помощью Themeify;
- ◆ обновление прошивки принтера с помощью Firmware Updater;
- ◆ добавление поддержки определенных принтеров, таких как старые принтеры Flashforge или современные – Flashforge, Dremel или PowerSpec;
- ◆ взаимодействие с официальным репозиторием подключаемых модулей (плагинов) OctoPrint;

- ◆ управление и отслеживание каждого аспекта 3D-принтера и заданий на печать прямо из браузера;
- ◆ доступ к встроенной веб-камере и удалённое наблюдение за принтером;
- ◆ получение постоянной обратной связи о ходе выполнения задания;
- ◆ отслеживание температуры хот-эндом и печатной платформы;
- ◆ перемещение печатающей головки по всем осям, выдавливание, втягивание или определяйте собственные элементы управления;
- ◆ запуск, остановка или приостановка текущего задания на печать, его полный контроль в любое время;
- ◆ создание замедленных записей своих процессов печати;
- ◆ нарезка файлов STL прямо в OctoPrint;
- ◆ контроль управления принтером посторонними людьми с помощью встроенных элементов управления доступом;
- ◆ добавление системных команд в меню, чтобы легко выключить или перезагрузить сервер OctoPrint или даже принтер;
- ◆ настройка обработчика событий, для реагирования на определённые события в OctoPrint, вызывая внешние команды.

Программа контролирует действия принтера посредством веб-браузера и портативных устройств. Можно загружать задания на печать без SD-карт.

Положительными моментами программы являются открытый исходный код и «богатая» функциональная наполненность.

Программа бесплатная с поддержкой Windows, Mac, Linux, Raspberry Pi.

Таким образом, рассмотрен ряд современных программ-слайсеров, которые для удобства сведены в компактную таблицу.

Слайсер	Ориентация	Доступность	Поддержка
1. 3DPrinterOS	новичок, продвинутый	беспл./платно	Windows, Mac, браузер
2. Astroprint	новичок, продвинутый	беспл./платно	Raspberry Pi, браузер
3. CraftWare	новичок, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
4. Cura	новичок, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
5. IceSL	новичок, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
6. ideaMaker	новичок, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
7. KISSlicer	новичок, продвинутый	беспл./платно	Windows, Mac, Linux Raspberry Pi
8. MakerBot Print	начинающий	бесплатно	Windows, Mac,
9. MatterControl	новичок, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
10. Netfabb	средний, продвинутый	беспл./платно	Windows
11. OctoPrint	средний, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux Raspberry Pi
12. Repetier	средний, продвинутый	бесплатно	Windows, Mac, Linux
13. SelfCAD	новичок, продвинутый	беспл./платно	Браузер
14. Simplify3D	новичок, продвинутый	платная	Windows, Mac
15. Slic3r	опытный, профессиональный	бесплатно	Windows, Mac, Linux
16. SliceCrafter	опытный	бесплатно	Браузер

Заключение. На основании выполненного обзора программного обеспечения слайсеров можно сделать несколько выводов.

1. Несмотря на стремление представить в обзоре как можно больше стран производителей программ-слайсеров, необходимо отметить, что США занимают свыше 40% рынка подобного программного обеспечения. При этом Китай и Чехия имеют примерно по 12% рынка и по 5% – такие страны, как Великобритания, Венгрия, Польша, Нидерланды, Израиль, Германия, Франция. Лидирующие позиции США объясняются тем, что они являются родоначальниками аддитивной технологии, первыми, кто спроектировал и выпустил 3D-принтер и кто с середины 80-х годов минувшего столетия постоянно развивал это перспективное направление.

2. Анализ слайсеров показал, что производители программного обеспечения ориентируют около 70% своего продукта на новичков и продвинутых пользователей. В тоже время доля выпускаемых на рынок программ, ориентированных на опытных и профессиональных пользователей составляет примерно 30%. Это можно объяснить тем, что сегодня 3D-принтер стал доступен широкому кругу пользователей, которые активно пробуют возможности в 3D-печати, не имея для этого достаточно знаний и навыков. Для таких пользователей как указывают производители создавались такие программы, как 3DPrinterOS, Astroprint, CraftWare, Cura, IceSL, ideaMaker, KISSlicer, MakerBot Print, MatterControl, Netfabb, OctoPrint, Repetier, SelfCAD и ряд других.

3. С целью популяризации своих программ-слайсеров производители распространяют их либо полностью бесплатно, либо выпускают бесплатные версии для пользователей новичков, а для опытных и профессиональных пользователей выпускают платные версии, например, программы SelfCAD, Netfabb, KISSlicer, 3DPrinterOS, Astroprint.

4. Кроме рассмотренных в статье слайсеров существует, по меньшей мере, ещё два десятка подобных программ, заслуживающих не только упоминания, но и отдельного обзора (Slic3R, Prusa Slicer, Repetier-Host, Kisslicer, Skeinforge). Разработчики Windows 10 даже встроили в свою ОС приложение для работы с 3D печатью, позволяющее обрабатывать и отправлять на печать модель. При таком обилии слайсеров выбор среди них для пользователя – задача непростая. Однако её можно упростить, если пользователь будет хорошо понимать свои цели, приоритеты и круг необходимых ему задач. Непонимание этих простых начальных условий приводит к тому, что пользователи сначала устанавливают себе слайсеры, которые им не подходят.

5. В последнее время среди производителей 3D-принтеров наметился устойчивый тренд на смещение особого внимания с технической стороны устройств на удобство и простоту его использования. Производители отмечают, что во многом это связано со снижением маркетинговой привлекательности «железа» и возрастании роли комфортной среды пользователя. Такую среду характеризует настолько эффективный уровень доступности, хранения и подготовки моделей к печати, что не привязывает пользователя к оборудованию во времени и пространстве. Поэтому производители стали активно развивать мобильные приложения поддерживающие работу в браузере, например такими программами являются SliceCrafter, 3DPrinterOS, Astroprint.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Astroprint. – URL: astroprint.com/ (дата обращения: 20.10.2021).
2. CraftWare. – URL: craftware.com/ (дата обращения: 20.10.2021).
3. Cura. – URL: ultimaker.com/software/ultimaker-cura (дата обращения: 20.10.2021).
4. IceSL. – URL: icesl.loria.fr/download/ (дата обращения: 20.10.2021).
5. IdeaMaker. – URL: raise3d.ru/news/raise3d-vypustili-novuyu-versiyu-ideamaker-4-0/ (дата обращения: 20.10.2021).

6. Kirimoto. – URL: docs.grid.space/projects/kiri-moto (дата обращения: 20.10.2021).
7. KISSlicer. – URL: 3d-m.ru/programmnoe-obespechenie-kisslicer-pro/ (дата обращения: 20.10.2021).
8. MakerBot Print. – URL: makerbot.com/3d-printers/apps/makerbot-print/ (дата обращения: 20.10.2021).
9. MatterControl. – URL: matterhack-ers.com/store/l/mattercontrol/sk/MKZGTDW6 (дата обращения: 20.10.2021).
10. PrusaSlicer. – URL: 3deshnik.ru/blogs/dark184-/prusaslicer-nachalo (дата обращения: 20.10.2021).
11. Repetier. – URL: repetier.com/about-us/ (дата обращения: 20.10.2021).
12. SelfCAD. – URL: .selfcad.com/ (дата обращения: 20.10.2021).
13. Slic3r. – URL: slic3r.org/ (дата обращения: 20.10.2021).
14. SliceCrafter. – URL: topbestalternatives.com/-sliceafter/ (дата обращения: 20.10.2021).
15. Simplify3D. – URL: top3dshop.ru/blog/best-slicers-for-3d-printer-rus-eng.html#table (дата обращения: 20.10.2021).
16. Netfabb Standard. – URL: ddmlab.ru/catalog-/netfabb/ (дата обращения: 20.10.2021).
17. Pathio. – URL: all3dp.com/4/pathio-slicer-e3d/ (дата обращения: 20.10.2021).
18. OctoPrint. – URL: octoprint.org/ (дата обращения: 20.10.2021).
19. Tinkerine Suite. – URL: 3dprint.com/121060/-tinkerine-suite-v-2-0/ (дата обращения: 20.10.2021).
20. 3DPrinterOS. – URL: 3dprinterOS.com/ (дата обращения: 20.10.2021).

REFERENCES

1. Astroprint. Available at: astroprint.com/ (accessed 20 October 2021).
2. CraftWare. Available at: craftware.com/ (accessed 20 October 2021).
3. Cura. Available at: ultimaker.com/software/ultimaker-cura (accessed 20 October 2021).
4. IceSL. Available at: //icesl.loria.fr/download/ (accessed 20 October 2021).
5. IdeaMaker. Available at: raise3d.ru/news/raise3d-vypustili-novuyu-versiyu-ideamaker-4-0/ (accessed 20 October 2021).
6. Kirimoto. Available at: docs.grid.space/projects/kiri-moto (accessed 20 October 2021).
7. KISSlicer. Available at: 3d-m.ru/programmnoe-obespechenie-kisslicer-pro/ (accessed 20 October 2021).
8. MakerBot Print. Available at: makerbot.com/3d-printers/apps/makerbot-print/ (accessed 20 October 2021).
9. MatterControl. Available at: matterhack-ers.com/store/l/mattercontrol/sk/MKZGTDW6 (accessed 20 October 2021).
10. PrusaSlicer. Available at: 3deshnik.ru/blogs/dark184-/prusaslicer-nachalo (accessed 20 October 2021).
11. Repetier. Available at: repetier.com/about-us/ (accessed 20 October 2021).
12. SelfCAD. Available at: .selfcad.com/ (accessed 20 October 2021).
13. Slic3r. Available at: slic3r.org/ (accessed 20 October 2021).
14. SliceCrafter. Available at: topbestalternatives.com/-sliceafter/ (accessed 20 October 2021).
15. Simplify3D. Available at: top3dshop.ru/blog/best-slicers-for-3d-printer-rus-eng.html#table (accessed 20.10.2021).
16. Netfabb Standard. Available at: ddmlab.ru/catalog-/netfabb/ (accessed 20 October 2021).
17. Pathio. Available at: all3dp.com/4/pathio-slicer-e3d/ (accessed 20 October 2021).
18. OctoPrint. Available at: octoprint.org/ (accessed 20 October 2021).
19. Tinkerine Suite. Available at: 3dprint.com/121060/-tinkerine-suite-v-2-0/ (accessed 20 October 2021).
20. 3DPrinterOS. Available at: 3dprinterOS.com/ (accessed 20 October 2021).

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Лисяк Владимир Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: vvlisyak@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371625; кафедра САПР; доцент.

Lisyak Vladimir Vasil'evich – Southern Federal University; e-mail: vvlisyak@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371625; the department of CAD; associate professor.

А.В. Мангушев**РЕАЛИЗАЦИЯ MQTT КЛИЕНТА НА БАЗЕ ОДНОКРИСТАЛЬНОГО
МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ЗАДАЧ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЕМ**

Описывается устройство, осуществляющее передачу данных и обработку команд по протоколу MQTT в сети Интернет. Изготовлена небольшая партия для оценки работоспособности в реальной практике. Программное обеспечение для микроконтроллера написано на языке Си с применением операционной системы реального времени (ОСРВ), позволяющей упорядочить разработку программного обеспечения за счет псевдопараллельного исполнения кода, механизмов синхронизации задач (семафоров, мьютексов), механизма очередей. В работе представлен пример алгоритма взаимодействия задач FreeRTOS: задачи ожидания команды от сервера, задачи измерения температуры, основного потока, выполняющего пересылку сообщения на сервер в ответ на появление строки в очереди сообщений. Ядро разрабатываемого MQTT-клиента составляют микроконтроллер STM32 и GSM/GPRS-модуль SIM800. На устройстве выведено большое число интерфейсов, что позволяет подключать самую разнообразную периферию (датчики температуры, влажности, давления, сервоприводы и т.д.). Устройство способно самостоятельно восстанавливать подключение к сети в случае его обрыва. Используется собственная реализация протокола MQTT версии 3.1 QoS 0 в программном обеспечении управляющего микроконтроллера. Сообщения MQTT передаются в рамках TCP-подключения, устанавливаемого средствами GSM-модуля. Управляющий микроконтроллер общается с GSM-модулем посредством AT-команд. Реализована возможность двустороннего обмена сообщениями в реальном времени, что позволяет использовать разработанную микропроцессорную систему как в режиме автономного управляющего устройства, так и в интерактивном режиме выполнения команд, поступающих по беспроводной сети, и отправки статусов исполнения этих команд. Главной особенностью MQTT-клиента является возможность удаленного обновления программного обеспечения микроконтроллера (OTA), реализованное с использованием вспомогательного микроконтроллера и микросхемы flash-памяти. Разработанный MQTT-клиент предназначен для использования в качестве основы микропроцессорных систем – клиентов Интернета вещей.

Интернет вещей; программно-аппаратное решение; mqtt; микроконтроллер; gsm; операционная система реального времени; rtos; ota.

A.V. Mangushev**MQTT CLIENT IMPLEMENTATION BASED ON A SINGLE-CHIP
MICROCONTROLLER FOR REMOTE EQUIPMENT MANAGEMENT TASKS**

The article describes a device that transmits data and processes commands over the MQTT protocol on the Internet. A small batch was made to assess the performance in real practice. The software for the microcontroller is written in C using a real-time operating system (RTOS), which allows you to streamline software development through pseudo-parallel code execution, task synchronization mechanisms (semaphores, mutexes), and a queue mechanism. The paper presents an example of an algorithm for the interaction of FreeRTOS tasks: the tasks of waiting for a command from the server, the tasks of measuring temperature, the main thread that sends a message to the server in response to the appearance of a line in the message queue. The core of the MQTT client being developed is the STM32 microcontroller and the GSM/GPRS SIM800 module. A large number of interfaces are displayed on the device, which allows you to connect a wide variety of peripherals (temperature, humidity, pressure sensors, servos, etc.). The device is able to independently restore the connection to the network in case of its interruption. The proprietary implementation of the MQTT protocol version 3.1 QoS 0 is used in the software of the control microcontroller. MQTT messages are transmitted as part of a TCP connection established by means of a

GSM module. The control microcontroller communicates with the GSM module via AT commands. The possibility of two-way real-time messaging is implemented, which allows using the developed microprocessor system both in the mode of an autonomous control device and in the interactive mode of executing commands received wirelessly and sending the execution statuses of these commands. The main feature of the MQTT client is the ability to remotely update the microcontroller software (OTA), implemented using an auxiliary microcontroller and a flash memory chip. The developed MQTT client is intended to be used as the basis of microprocessor systems - clients of the Internet of Things.

Internet of things; mqtt protocol; microcontroller; gsm; real-time operating system; rtos; ota.

Введение. Со все большим распространением Интернета становится достаточно легко подключить разработанное устройство к сети, что позволяет с меньшим вмешательством человека автоматизировать различные процессы. При построении сетей Интернета вещей на первый план выходят протоколы машинно-машинного взаимодействия, среди которых наибольшее распространение получил протокол MQTT (англ. Message Query Telemetry Transport), реализующий обмен сообщениями в режиме «издатель-подписчик». Среди систем, использующих этот протокол, встречаются системы мониторинга и удаленного управления. Например, в [1] рассматривается разработка системы мониторинга для обнаружения частиц пыли, опасных газов, контроля температуры и влажности в окружающей среде, в [2] разработана система мониторинга загрязнения воздуха с использованием технологии Интернета вещей. В [3] предлагается прикладной протокол, позволяющий в рамках одного MQTT-подключения работать сразу с несколькими темами. В [4] представляется разработка и внедрение недорогой SCADA-системы с открытым исходным кодом. В [5] представлена гибридная носимая сенсорная сетевая система для мониторинга здоровья и повышения безопасности на рабочем месте. В [6] рассматривается разработка системы для отслеживания показаний энергопотребления в системе «умного дома». В [7] предлагается получать дополнительную энергию для носимых гаджетов из радиоволн и нагрева человеческого тела. В [8] был произведен анализ технологий Интернета вещей, используемых при уходе за пожилыми людьми. Поэтому разработка устройств – микропроцессорных систем, получающих и отправляющих в Интернет данные в режиме реального времени, обеспечивающих возможность оперативного отслеживания показаний датчиков и возможность удаленного управления различными приборами, при этом обладающих высокой надежностью и легко конфигурируемых программно, представляется актуальной [9].

Аппаратная часть MQTT-клиента.

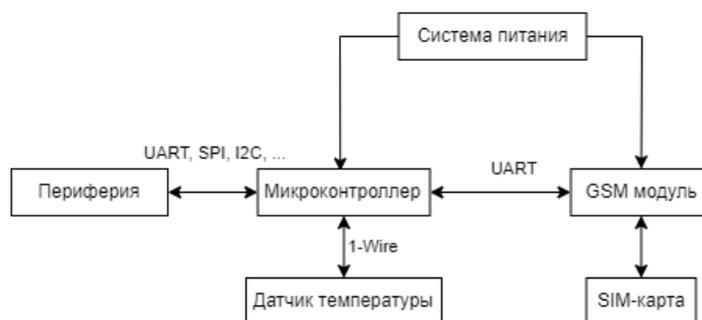


Рис. 1. Структурная схема устройства

На структурной схеме (рис. 1) представлены основные блоки устройства.

В качестве центрального микроконтроллера был применен STM32F446RE [10], поскольку имеет достаточную память и быстродействие, аппаратную поддержку вычислений с плавающей точкой, необходимых в перспективе использования разрабатываемого устройства в приложениях, требующих широкого использования цифровой обработки сигналов.

Для выхода в Интернет используется сеть GPRS, имеющая широкое покрытие и достаточную для передачи управляющих сообщений пропускную способность.

Используется широкофункциональный GSM/GPRS модуль SIM800 [11], поддерживающий подключение к сети при помощи стека TCP/IP. Управляющий микроконтроллер реализует прикладной протокол обмена данными в рамках сообщений, передаваемых по протоколу MQTT[12], который, в свою очередь, работает поверх протокола TCP. Само TCP-соединение осуществляется средствами GSM-модуля. Управление GSM-передатчиком производится через интерфейс UART посредством передачи строковых AT-команд. Также следует отметить, что у производителя данных модулей имеются также линейки для более современных стандартов связи (в первую очередь, NB IoT [13]) с практически полной сохранностью протокола общения, что в будущем позволит без особых сложностей перенести проект на другой класс беспроводных сетей.

В качестве протокола общения между пользователем и устройством был применен MQTT (англ. Message Query Telemetry Transport). К его особенностям можно отнести отсутствие высоких требований к производительности устройства и возможность широковещательной передачи по системе издатель-подписчик. Сообщения передаются от издателя в конкретную тему (топик). Подписчики могут получать данные от множества издателей, в зависимости от подписки на соответствующие темы. Одно устройство может одновременно выступать и в качестве издателя, и в качестве подписчика. Реализуется данный протокол поверх TCP/IP [14].

Питание устройства осуществляется от напряжения 12В, что позволяет подключать соответствующую периферию. Микроконтроллер подключается через линейный преобразователь, но сначала напряжение понижается импульсным преобразователем для снижения нагрузки на линейный.

В текущей версии модуля выведены все основные аппаратные интерфейсы контроллера: I2C, UART, SPI, а также некоторое количество портов ввода вывода, что позволяет без труда подключать дополнительное оборудование. Во время отладки программы в качестве внешнего сенсора применялся датчик температуры DS18B20.

Алгоритм работы устройства. Программа для микроконтроллера основана на операционной системе реального времени (ОСРВ) FreeRTOS [15, 16], работа с периферийными устройствами осуществляется при помощи предоставляемой производителем микроконтроллеров библиотеки HAL, обеспечивающей переносимость кода между микроконтроллерами STM32 различных серий. Такое решение позволяет в будущем поддерживать код и добавлять новую функциональность.

Рассмотрим алгоритм работы системы с помощью диаграммы активностей (рис. 1, 2). Каждый из потоков (задач) обозначен в виде законченного алгоритма с бесконечным циклом. После подачи питания начинается выполнение инициализация GSM модуля, происходящая в задаче с самым высоким приоритетом (StartSIM800Task). В случае ошибки на каком-либо этапе инициализация начинается с начала. После её завершения эта задача удаляется, освобождая мьютекс (UARTMutex), отвечающий за доступ потоков к интерфейсу общения с GSM-модулем. Далее начинается выполнение задачи, инициализирующая подключение к серверу и подписку на соответствующий топик (StartMQTTConnectTask). В случае нескольких неудачных попыток подключения происходит создание пер-

вой задачи (StartSIM800Task) и процесс повторяется. Далее этот поток также уничтожается, и в фоне начинают работать несколько потоков: задача по умолчанию (default_task), задача отправки пинг-пакета (PINGStartTask), задача отправки данных на сервер (StartSIM800SendTask), задача обработки входящих команд (MessHandlerTask) и задача измерения температуры (StartGetTempTask). Для синхронизации работы потоков применяются счетные семафоры, очереди и мьютексы. Задача StartGetTempTask ожидает выставления семафора SemGetTemp, задача StartSIM800SendTask – освобождения мьютекса UARTMutex и наличия сообщений в очереди на передачу, задача MessHandlerTask – наличия новой строки в очереди команд. Задача PINGStartTask отправляет раз в несколько секунд пинг-пакет, поддерживающий соединение открытым. Замер времени между посылками пинг-пакета происходит при помощи таймера, обнуляемого при передаче какого-либо сообщения по соединению.

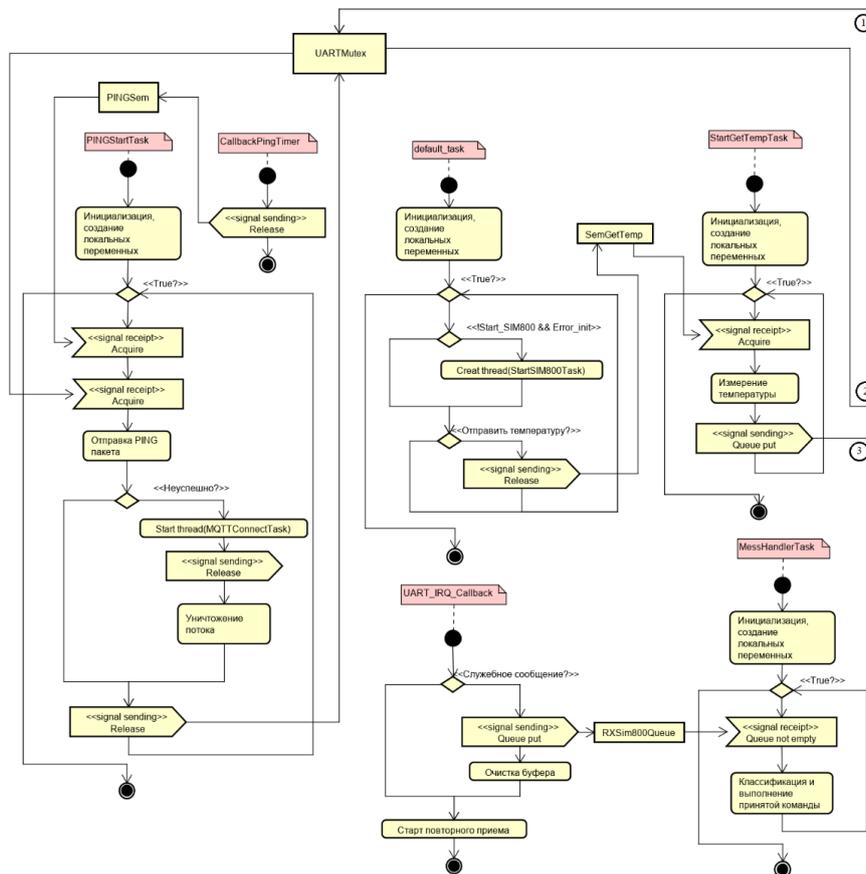


Рис. 2. Диаграмма активностей программы для микроконтроллера, часть 1

Задача по умолчанию переключает состояние светодиода, демонстрируя отсутствие зависания системы. В случае обнаружения ошибок в работе модуля происходит создание потока инициализации StartSIM800Task. Разбор сообщений от модуля происходит в задаче (MessHandlerTask): принятые от GSM-модуля строки, воспринимаемые как полезные данные, направляются в обработчике прерывания в соответствующую очередь (RXSim800Queue).

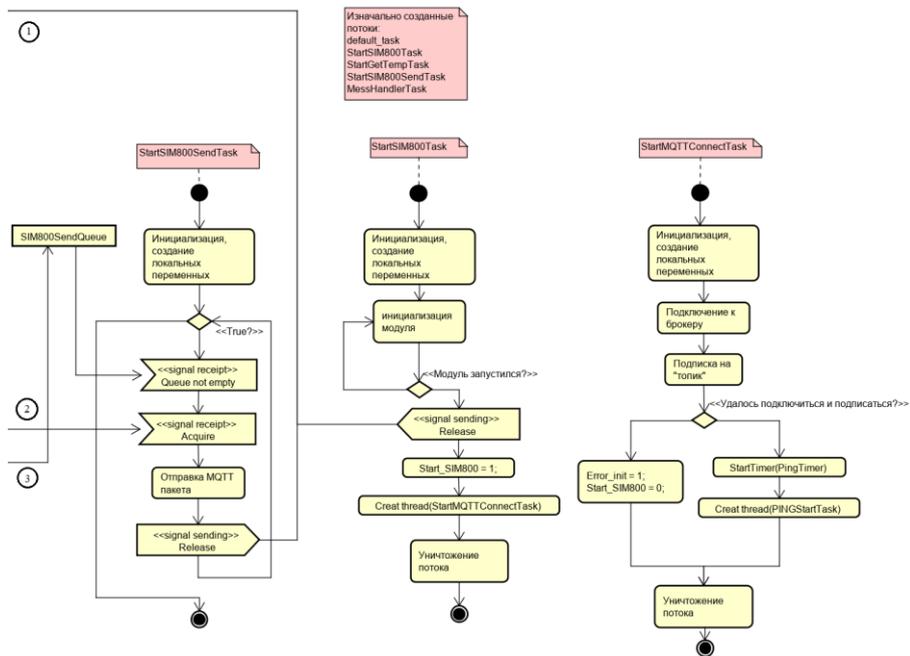


Рис. 3. Диаграмма активностей программы для микроконтроллера, часть 2

Удаленное обновление программы микроконтроллера. Одной из ключевых особенностей системы является возможность удаленно обновить программу микроконтроллера через Интернет (англ. over-the-air, OTA). Рассмотрим, каким образом данная система реализована в проекте, для чего обратимся к диаграмме последовательностей (рис. 4).

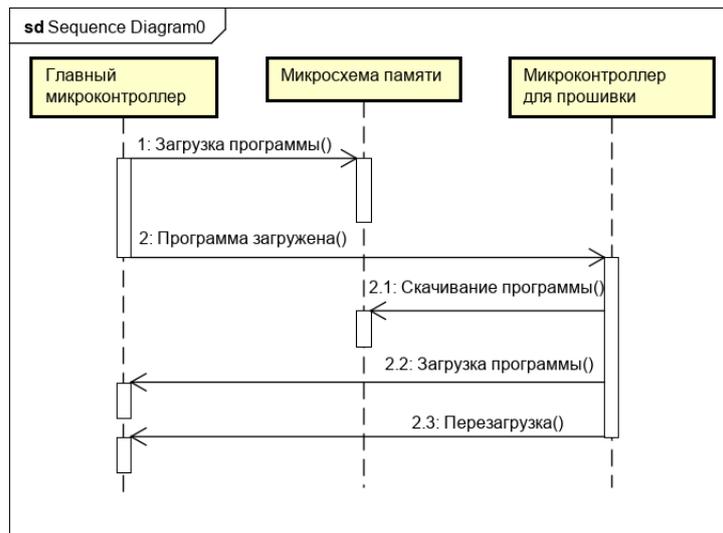


Рис. 4. Диаграмма последовательностей удаленного обновления программы для микроконтроллера

Для того чтобы обновить программу, мы предварительно сохраняем файл с ней на сервере и отправляем устройству команду обновления. После этого начнется загрузка файла с сервера по протоколу FTP. Инициализация FTP-подключения выполняется самим GSM-модулем, при этом управляющий микроконтроллер посылает GSM-модулю соответствующие AT-команды. Загруженный файл сохраняется на внешней микросхеме flash-памяти. Далее управление передается вспомогательному микроконтроллеру, который загрузит новую программу в основной микроконтроллер. В случае успешной загрузки вспомогательный микроконтроллер возвращает управление основному микроконтроллеру, и устройство переходит в штатный режим работы.

На рис. 5 в качестве главного микроконтроллера выступает F446, а в качестве вспомогательного – F103.

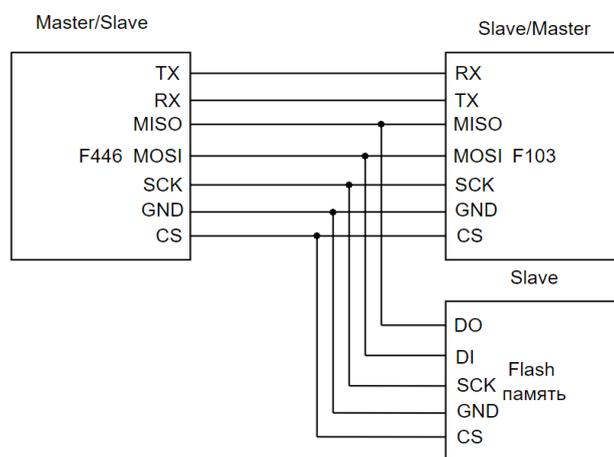


Рис. 5. Схема соединения микроконтроллеров и flash-памяти

Микросхема памяти подключается через интерфейс SPI, и возникает проблема того, что один микроконтроллер должен записать в нее данные, а другой считать, то есть на одной шине должны будут два устройства, способные быть ведущими на шине. Согласно протоколу SPI [17] можно подключать на одну шину более одного устройства, но в каждый момент времени только одно из них может быть ведущим на шине (master). Микросхема памяти всегда является ведомым устройством (slave), поэтому необходимо передавать полномочия ведущего между двумя микроконтроллерами. Для этого контроллеры соединены через интерфейс UART. Изначально оба устройства являются ведомыми. После начала процесса обновления основной контроллер переходит в режим ведущего и записывает данные в микросхему памяти, после чего становится ведомым и отправляет команду второму микроконтроллеру на разрешение стать ведущим на шине SPI. После загрузки программы в главный контроллер вспомогательный микроконтроллер вновь становится ведомым, и мы вновь имеем три ведомых устройства на шине. Такая конфигурация реализуема вследствие того, что для каждого из контроллеров можно настраивать его состояние на шине программным способом без изменения назначения выводов.

Однако в ходе испытаний выяснилось, что данное решение не применимо в описанном выше виде. Когда оба контроллера находятся в своем обычном состоянии все функционирует должным образом, однако при переводе основного микро-

контроллера в режим прошивки, состояние его ножек становится неопределенным и не позволяет подавать необходимые для работы с flash-памятью сигналы. Для решения данной проблемы необходимо отключать основной микроконтроллер от шины SPI, для чего была предложена следующая схема (рис. 6).

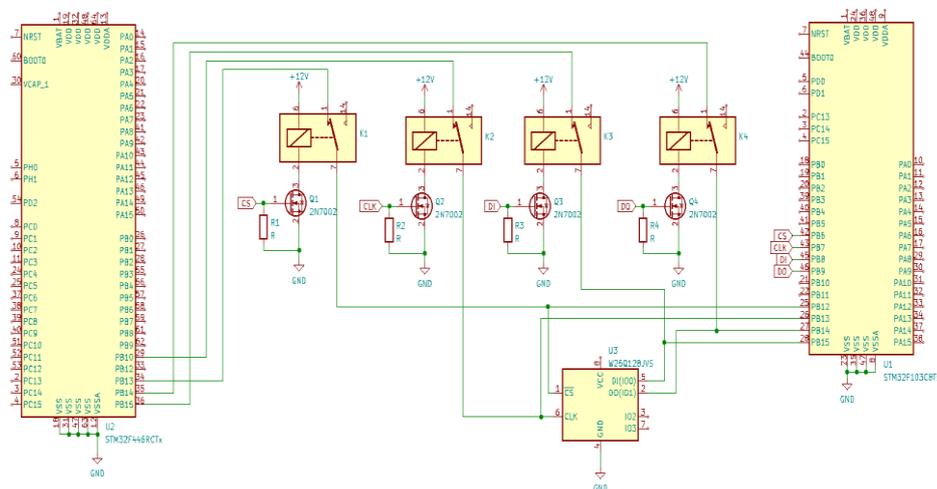


Рис. 6. Обновленная схема соединения микроконтроллеров и flash-памяти

По умолчанию на обмотки всех реле не поступает никакого напряжения и схема соединения эквивалента рис. 5, но после получения сигнала для начала обновления прошивки вспомогательный микроконтроллер подает напряжение на все обмотки реле и основной микроконтроллер отсоединяется от шины. После завершения обновления реле переходят в изначальное состояние.

В [18] рассматривается создание аналогичного устройства, однако оно имеет ряд недостатков, и в представленном виде не подходит под контрактное производство и промышленное применение. В качестве GSM/GPRS модуля применен SIM800L, являющийся не полнофункциональным клоном линейки модулей SIM800, не поддерживающим часть необходимых AT-команд, позволяющих упростить реализацию некоторых аспектов. Также устройство состоит из отдельных готовых модулей, что не совсем пригодно для контрактного производства и промышленного применения. Кроме того, программа для микроконтроллера в [18] составлена с использованием уже устаревшей библиотеки SPL для работы со встроенной периферией микроконтроллеров STM32 серии F1, что затрудняет перенос функциональности на микроконтроллеры других семейств. Разработанный прототип сводит наличие указанных недостатков к минимуму. В [19–20] рассматривается проблема уязвимости подобных систем к различным сетевым атакам, поэтому в следующей версии устройства особое внимание будет уделено улучшению сетевой безопасности, в частности, использование TLS-шифрования TCP-подключения, создаваемого GSM/GPRS-модулем.

Приложение для взаимодействия с устройством. Для более удобного взаимодействия с устройством было разработано приложение на языке C#. Для реализации графического интерфейса был применен фреймворк WPF (англ. Windows Presentation Foundation). На рис. 7 представлен скриншот окна разработанного приложения.

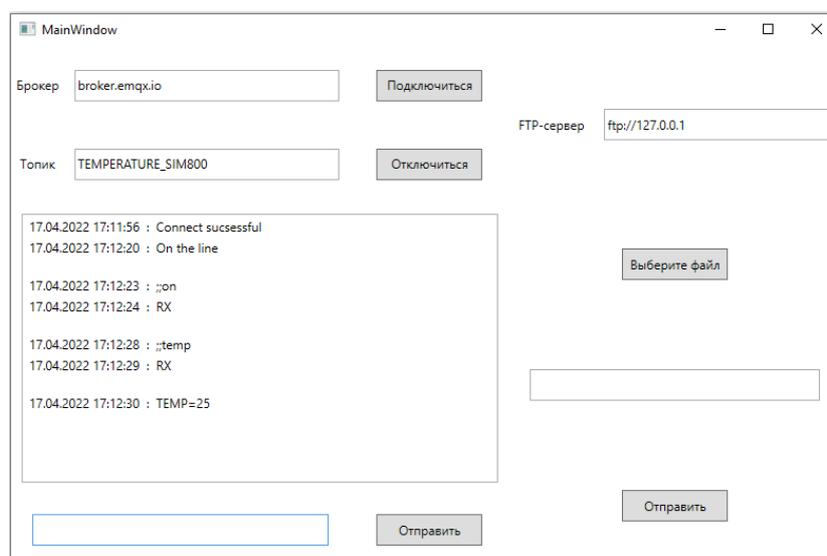


Рис. 7. Окно клиентского приложения

На данный момент приложение обладает следующим функционалом:

1. Подключение к MQTT брокеру.
2. Подписка на топик и отправка сообщений в него.
3. Подключение к FTP серверу с возможностью загрузки файла обновляемой программы.

Заключение. В результате проделанной работы была разработана и изготовлена первая версия устройства, обеспечивающая подключение к MQTT серверу и обработку некоторого количества команд. Кроме того, была реализована возможность удаленно обновить программу микроконтроллера для дальнейшего совершенствования устройства. В дальнейшем планируется учесть конструктивные недоработки первой версии и изготовить вторую, доработанную версию с целью отладки программного обеспечения в реальных условиях. Планируется также реализовать шифрование трафика с целью предотвращения несанкционированного доступа к управляемым устройствам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saidatul Norlyana Azemi et al. An IoT-Based Alarm Air Quality Monitoring System // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1755. – 012035.
2. Hussein M., Galal A.I., Abd-Elrahman E., Zorkany M. Internet of Things (IoT) Platform for Multi-Topic Messaging // Energies. – 2020. – No. 13. – 3346. – <https://doi.org/10.3390/en13133346>.
3. Lawrence O., Aghenta M. Tariq Iqbal. Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, Things Board and MQTT protocol // J. AIMS Electronics and Electrical Engineering. – 2020. – No. 4 (1). – P. 57-86. – DOI: 10.3934/ElectrEng.2020.1.57.
4. Wu F., Wu T., Yuce M.R. An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications // Sensors. – 2019. – No. 19. – P. 21. – <https://doi.org/10.3390/s19010021>.
5. Saraereh O.A., Alsaraira A., Khan I., Choi B.J. A Hybrid Energy Harvesting Design for On-Body Internet-of-Things (IoT) Networks // Sensors. – 2020. – No. 20. – P. 407. – <https://doi.org/10.3390/s20020407>.
6. Sudarsono Novianta M.A., & Parwati,C.I. Application of Internet of Things (IoT) on air pollution monitoring database system // E3S Web of Conferences. – 2019.

7. *Syafaah L. et al.* Distance Measurement of ESP8266 for Control and Monitoring in Smart Home Application // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1381. – 012058.
8. *Hongan Mu et al.* Discovering and Analyzing Internet of Things (IoT) Technologies and Applications for Aged Care // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1948. – 012141.
9. *Ядгарова Ю.В.* Модель и алгоритм выбора программной архитектуры для систем Интернета вещей // Программные продукты и системы. – 2019. – № 4. – С. 682-689. – EDN QLQDSZ.
10. Микроконтроллеры линейки STM32F446. – URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446.html> (дата обращения: 29.05.2022).
11. Модуль SIM800. – URL: <https://www.simcom.com/> (дата обращения: 29.05.2022).
12. *Ли П.* Архитектура интернет вещей: пер. с англ. М.А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2019. – С. 282-293.
13. Стандарт NB-IoT: применение и перспективы // Беспроводные технологии. – 2019. – № 3 (56). – С. 27-31. – EDN SUHNQH.
14. *Батыев Б.* Работа со встроенным TCP/IP-стеком модулей GSM/GPRS серии SIM800 компании SIMCom Wireless Solutions // Беспроводные технологии. – 2016. – № 2 (43). – С. 38-43. – EDN XRLINH.
15. Операционная система реального времени FreeRTOS. – URL: <https://www.freertos.org/features.html> (дата обращения: 29.05.2022).
16. *Курниц А.* FreeRTOS - операционная система для микроконтроллеров // Компоненты и технологии. – 2011. – № 2 (115). – С. 96-100. – EDN NCDJHZ.
17. Цифровой синтез: практический курс / под общ. ред. А.Ю. Романова, Ю.В. Панчула. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 556 с.
18. *Конченков В.И., Скакунов В.Н.* Реализация MQTT-клиента на основе микроконтроллера: учеб.-метод. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2021. – 64 с.
19. *Lee In.* Internet of Things (IoT) Cybersecurity: Literature Review and IoT Cyber Risk Management // *Future Internet.* – 2020. – Vol. 12. – P. 157.
20. *Spielvogel K., Pöhls H.C., Posegga J.* TLS Beyond the Broker: Enforcing Fine-Grained Security and Trust in Publish/Subscribe Environments for IoT. In: Roman R., Zhou J. (eds) // *Security and Trust Management. STM 2021. Lecture Notes in Computer Science.* – 2021.
21. – Vol. 13075. – Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-91859-0_8.

REFERENCE

1. *Saidatul Norlyana Azemi et al.* An IoT-Based Alarm Air Quality Monitoring System, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, Vol. 1755, 012035.
2. *Hussein M., Galal A.I., Abd-Elrahman E., Zorkany M.* Internet of Things (IoT) Platform for Multi-Topic Messaging, *Energies*, 2020, No. 13, 3346. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13133346>.
3. *Lawrence O., Aghenta M. Tariq Iqbal.* Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, Things Board and MQTT protocol, *J. AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 2020, No. 4 (1), pp. 57-86. DOI: 10.3934/ElectrEng.2020.1.57.
4. *Wu F., Wu T., Yuce M.R.* An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications, *Sensors*, 2019, No. 19, pp. 21. Available at: <https://doi.org/10.3390/s19010021>.
5. *Saraereh O.A., Alsaraira A., Khan I., Choi B.J.* A Hybrid Energy Harvesting Design for On-Body Internet-of-Things (IoT) Networks, *Sensors*, 2020, No. 20, pp. 407. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20020407>.
6. *Sudarsono Novianta M.A., & Parwati, C.I.* Application of Internet of Things (IoT) on air pollution monitoring database system, *E3S Web of Conferences*, 2019.
7. *Syafaah L. et al.* Distance Measurement of ESP8266 for Control and Monitoring in Smart Home Application, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, Vol. 1381, 012058.
8. *Hongan Mu et al.* Discovering and Analyzing Internet of Things (IoT) Technologies and Applications for Aged Care, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, Vol. 1948, 012141.
9. *Yadgarova Yu.V.* Model' i algoritm vybora programmnoy arkhitektury dlya sistem Interneta veshchey [A model and algorithm for choosing a software architecture for Internet of Things systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2019, No. 4, pp. 682-689. EDN QLQDSZ.

10. Mikrokontrollery lineyki STM32F446 [Microcontrollers of the STM32F446 line]. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446.html> (accessed 29 May 2022).
11. Modul' SIM800 [SIM800 module]. Available at: <https://www.simcom.com/> (accessed 29 May 2022).
12. Li P. Arkhitektura internet veshchey [Architecture of the Internet of Things]: transl. from engl. by M.A. Raytmana. Мшчысцц: DMK Press, 2019б зз. 282-293.
13. Standart NB-IoT: primenenie i perspektivy [NB-IoT standard: application and prospects], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2019, No. 3 (56), pp. 27-31. EDN SUHNQH.
14. Batuev B. Rabota so vstroennym TCP/IP-stekom moduley GSM/GPRS serii SIM800 kompanii SIMCom Wireless Solutions [Working with the built-in TCP/IP stack of GSM/GPRS modules of the SIM800 series of SIMCom Wireless Solutions], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless Technologies], 2016, No. 2 (43), pp. 38-43. EDN XRLINH.
15. Operatsionnaya sistema real'nogo vremeni FreeRTOS [FreeRTOS real-time operating system]. Available at: <https://www.freertos.org/features.html> (accessed 29 May 2022).
16. Kurnits A. FreeRTOS - operatsionnaya sistema dlya mikrokontrollerov [FreeRTOS - operating system for microcontrollers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2011, No. 2 (115), pp. 96-100. EDN NCDJHZ.
17. Tsifrovoy sintez: prakticheskiy kurs [Digital synthesis: a practical course], under the general ed. A.Yu. Romanova, Yu.V. Panchula. Moscow: DMK Press, 2020, 556 p.
18. Konchenkov V.I., Skakunov V.N. Realizatsiya MQTT-klienta na osnove mikrokontrollera: ucheb.-metod. posobie [Implementation of an MQTT client based on a microcontroller: educational and methodical manual]. Volgograd: VolgGTU, 2021, 64 p.
19. Lee In. Internet of Things (IoT) Cybersecurity: Literature Review and IoT Cyber Risk Management, *Future Internet*, 2020, Vol. 12, pp. 157.
20. Spielvogel K., Pöhls H.C., Posegga J. TLS Beyond the Broker: Enforcing Fine-Grained Security and Trust in Publish/Subscribe Environments for IoT. In: Roman R., Zhou J. (eds), *Security and Trust Management. STM 2021. Lecture Notes in Computer Science*, 2021, Vol. 13075. Springer, Cham. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91859-0_8.

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

Мангушев Александр Вячеславович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: mangushev2001@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79880522090; кафедра электронно-вычислительные машины и системы; студент.

Mangushev Aleksandr Vyacheslavovich – Volgograd State Technical University; e-mail: mangushev2001@yandex.ru; Volgograd, Russia; phone: +79880522090; the department of electronic computing machines and systems; student.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-84-103

Н.К. Полуянович, Н.В. Азаров, М.Н. Дубяго

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ*

Рассматривается нейροкомпьютерная система прогнозирования ресурса силовой кабельной линии (СКЛ) с использованием нейросетевых технологий. Выбрана аппаратная модульная реализация нейροкомпьютера (НК) реализованная на базе ПЛИС. Для решения задачи прогнозирования термических процессов СКЛ принято решение использовать цифровой нейрончик NeuroMatrix NM6404 с переменной структурой из-за их высокой производительности по сравнению с потребляемой мощностью, высокой степенью универсально-

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-29-00370.

сти. Для прогнозирования температурных режимов СКЛ была разработана искусственная нейросеть (ИНС) для определения текущего температурного режима для токоведущей жилы СКЛ. Выбрана архитектура ИНС для реализации НК системы прогнозирования температуры СКЛ, позволяющая производить долгосрочное прогнозирование температур СКЛ в режиме реального времени. Произведен выбор функции активации нейронов ИНС для реализации НК системы прогнозирования температуры СКЛ, позволяющий проводить долгосрочный прогноз температур СКЛ без увеличения погрешности при увеличении дальности прогноза. Предложенный нейросетевой алгоритм, выполняющий прогнозирование характеристик электрической изоляции СКЛ, основанный на методе скользящего окна для прогнозирования временных рядов, был апробирован на контрольной выборке экспериментальных данных, не входящих в состав выборки для обучения ИНС. Проведены экспериментальные исследования предлагаемого адаптивного метода прогнозирования, а именно разработан адаптивный алгоритм и выполнено прогнозирование термических процессов в изоляции СКЛ от тока нагрузки. Анализ результатов показал, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом. При анализе полученных данных было определено, что максимально достигнутое отклонение данных, полученных от ИНС в ходе эксперимента от данных в составе обучающей выборки, составило менее 3% что является вполне приемлемым для данного исследования результатом. Показано, что разрабатываемые методы и алгоритмы являются элементами комплексной системы управления энергосетью, а разработанная адаптивная НК модель позволяет проводить оценку текущего состояния изоляции и прогнозировать остаточный ресурс СКЛ.

Кабельные сети; нейросеть; электроизоляция; пропускная способность; прогнозирование.

N.K. Poluyanovich, N.V. Azarov, M.N. Dubyago

NEUROCOMPUTER CONTROL OF CABLE NETWORKS BANDWIDTH THROUGH ACCOUNTING AND CONTROL OF THEIR PARAMETERS

The article discusses a neurocomputer system for predicting the resource of a power cable line (PCL) using neural network technologies. A hardware modular implementation of a neurocomputer (NC) implemented on the basis of FPGA was selected. To solve the problem of predicting thermal processes of PCL, it was decided to use a NeuroMatrix NM6404 digital neurochip with a variable structure due to their high performance compared to power consumption, a high degree of versatility. To predict the temperature conditions of the PCL, an artificial neural network (INS) was developed to determine the current temperature regime for the current-carrying core of the PCL. The architecture of the INS for the implementation of the NC of the SCL temperature prediction system has been selected, which allows for long-term prediction of PCL temperatures in real time. The choice of the activation function of the INS neurons for the implementation of the NC of the SCL temperature prediction system, which allows for a long-term forecast of SCL temperatures without increasing the error with an increase in the forecast range. The proposed neural network algorithm that predicts the characteristics of the electrical insulation of the PCL, based on the sliding window method for predicting time series, was tested on a control sample of experimental data not included in the sample for training the INS. Experimental studies of the proposed adaptive forecasting method have been carried out, namely, an adaptive algorithm has been developed and the prediction of thermal processes in the isolation of the SCL from the load current has been performed. Analysis of the results showed that the longer the aging time, the greater the temperature difference between the original and aged sample. When analyzing the data obtained, it was determined that the maximum deviation of the data obtained from the INS during the experiment from the data in the training sample was less than 3%, which is quite acceptable for this study result. It is shown that the developed methods and algorithms are elements of an integrated power grid management system, and the developed adaptive NC model makes it possible to assess the current state of insulation and predict the remaining life of the PCL.

Cable networks; neural network; electrical insulation; bandwidth; forecasting.

Введение и постановка задачи. Любая система прогнозирования представляет из себя лишь, часть большей системы управления различными процессами. В связи с ростом и развитием новых энергоемких производств растёт потребление электроэнергии. Высокий уровень износа компонентов оборудования распределительного сетевого комплекса (~67% линий передач используется сверх нормы, а 26% в аварийном состоянии), что по итогу приводит к росту возникающих аварийных ситуаций в энергетическом секторе промышленности.

В процессе работы СКЛ изоляция по всей ее длине находится под воздействием различных факторов. Среди которых тепловое, электрическое, химическое, механическое, атмосферное и другие виды воздействий. В результате подобный воздействий на изоляционные материалы СКЛ происходит изменение их свойств [1].

Одним из основных параметров, характеризующих кабельную линию является их пропускная способность. Данный параметр определяется тепловым режимом. По величине нагрузочной способности также определяется площадь поперечного сечения проводника СКЛ и их пропускная способность.

В процессе проектирования СКЛ важно производить расчеты, которые должны учитывать величину пропускной способности. Но не смотря на обилие различных методов обладающих даже самой высокой точностью, невозможно учесть все нюансы, которые могут возникнуть в процессе прокладки и эксплуатации СКЛ. В связи с этим при проектировании СКЛ различные коэффициенты для них берутся с небольшим запасом, что порой приводит к недостаточной загруженности кабеля, либо наоборот, работают на границе допустимых температур [1].

Решение данных проблем будет возможно в случае использования систем мониторинга температур КЛ в процессе работы. Для создания инфраструктуры, позволяющей проводить диагностирование неисправностей СКЛ, использование ИНС является крайне перспективным направлением. Подобные системы могут служить в роли подсистемы выборки и принятия решений в задачах диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса СКЛ, а затем отдавать полученные данные в другие подсистемы управления.

Применение интеллектуальных систем прогнозирования крайне целесообразно в области энергетического сектора с целью снижения доли человеческого фактора в возникновении аварийных ситуаций, а также повышения общей надежности и эффективности при функционировании энергосетей.

Задачей данного исследования является разработка интеллектуальной системы, способной выполнять прогнозирование температур СКЛ, в частности жилы с целью планирования режимов работы электросети для общего повышения надежности и эффективности взаимодействия с объединенной энергосистемой.

В связи с неустойчивостью работ энергосети в процессе изменения режимов работы прогнозирование пропускной способности СКЛ становится труднореализуемой задачей. Однако, при использовании искусственного интеллекта как основы, с применением методов машинного обучения становится возможно достижение требуемых целей. Методы искусственных нейронных сетей считаются наиболее эффективными и перспективными.

Одним из решений указанной проблемы является осуществление мониторинга температуры кабеля во время работы. Однако такой мониторинг требует развития существующих методов диагностики таким образом, чтобы они могли быть реализованы в условиях неопределенности. Преодоление неопределенности, обусловленной неточностями модели температурного нагрева и действием возмущений, возможно за счет использования интеллектуальных технологий.

Целью работы является разработка методов интеллектуального прогнозирования температуры жилы СКЛ для планирования режимов работы электросети с целью повышения надежности и энергоэффективности их взаимодействия с объе-

диненной энергосистемой, а также автоматизация процесса мониторинга и снижение степени присутствия человека в непосредственной близости от диагностируемого высоковольтного оборудования без потери при этом информации о текущем техническом состоянии оборудования за счёт применения специализированной системы мониторинга состояния изоляции СКЛ.

Разрабатываемые методы и алгоритмы являются элементами комплексной системы управления энергосетью и направлены на эффективное и надежное взаимодействие распределенных энергетических комплексов с потребителями. Решением этой научной и технической проблемы станет обнаружение дефектов высоковольтного оборудования на ранней стадии их развития и, как следствие, предотвращение аварийных ситуаций, которые способны привести к серьезным негативным последствиям и повлиять на работу системы электроснабжения в целом [1]. Практическая ценность состоит в том, что разработанный проект реализуем на изготавливаемом промышленностью оборудовании, при минимальных затратах и обеспечивает надежную работу систем электроснабжения.

На основе предлагаемых методов планируется разработка устройств автоматической диагностики, способных функционировать в системах Smart Grid.

Система позволит:

- ◆ диагностировать и выявлять предаварийное состояние работы оборудования;
- ◆ повысить уровень дистанционной наблюдаемости объектов электрических сетей;
- ◆ снизить затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования;
- ◆ снизить затраты на восстановление работоспособности электрических сетей;

Внедрение "интеллектуальных" сетей в энергосистему, позволит регулировать подачу электроэнергии в зависимости от снижения или увеличения режима потребления.

- ◆ в автоматическом режиме диагностировать и устранять возникающие проблемы;
- ◆ поставлять электричество в необходимом количестве.

Методы прогнозирования термических процессов. Для непрерывного проведения мониторинга и контроля текущего теплового режима СКЛ системе мониторинга проводить постоянное прогнозирование скорости нагрева силовых кабельных линий в режиме реального времени. То есть, от текущего момента времени начала прогноза на заданное время вперед, которое может определяться специалистом. Можно выделить следующие основные методы прогнозирования: – интуитивные или экспертные (обобщение и статистическая обработка мнений экспертов); – формализованные: а) методы моделирования (используются физические, физико-математические и информационные модели на базе теории подобия); б) статистические методы (основаны на экстраполяции и интерполяции прогнозируемых параметров надежности на базе закономерности изменения параметров надежности во времени).

Очевидно, что в толщине изоляции при протекании тока по жиле максимальная температура будет возникать в тех слоях изоляции, которые непосредственно прилегают к жиле. Поэтому, когда рассчитывают длительно допустимый ток нагрузки, должно выполняться условие не превышения температуры жилы 90°C ($T_{ж} \leq 90^{\circ}\text{C}$).

Тепловое поле для КЛ, как и для других объектов, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое в общем случае определяет изменение распределения температуры в объеме рассматриваемого объекта в зависимости от времени.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\chi * \operatorname{grad}(T)) + \frac{q_v}{c_v},$$

где, T – температура, °К; t – время, с; q_v – мощность объемных источников тепла (объемная плотность тепловыделения), Вт/м³; c_v – объемная теплоемкость, Дж/(К·м³); χ – температуропроводность, м²/с. Коэффициент χ определяют по формуле $\chi = \lambda / c_v$, где λ – коэф. теплопроводности, Вт/(м·К).

Тепловое поле для КЛ, как и для других объектов, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности (1), которое в общем случае определяет изменение распределения температуры в объеме рассматриваемого объекта в зависимости от времени.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\chi * \operatorname{grad}(T)) + \frac{q_v}{c_v}, \quad (1)$$

где, T – температура, °К; t – время, с; q_v – мощность объемных источников тепла (объемная плотность тепловыделения), Вт/м³; c_v – объемная теплоемкость, Дж/(К·м³); χ – температуропроводность, м²/с. Коэффициент χ определяют по формуле $\chi = \lambda / c_v$, где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

С применением аналитических преобразований и эмпирических формул была создана методика оценки тепловых стационарных режимов КЛ ИЕС 60287 [2], учитывающая все применяемые на практике конструкции КЛ. Модель Нейера-МакГрафа [3] лежит в основе стандарта ИЕС 60287, которую развили и применили к различным конструкциям КЛ другие авторы, например [4, 5].

Суть методики ИЕС 60287 сводится к определению величины допустимого тока нагрузки кабелей по формуле

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{T_{\text{доп}} - T_0 - Q_{\partial}(0.5R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4})}{R_{\text{ж}}R_{T1} + R_{\text{ж}}(1 + \Delta_1)R_{T2} + R_{\text{ж}}(1 + \Delta_1 + \Delta_2)(R_{T3} + R_{T4})}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{доп}}$ – допустимая рабочая температура кабеля (для СПЭ изоляции – 90°C), °С; T_0 – температура окружающей среды, °С; Q_{∂} – диэлектрические потери в изоляции на единицу длины, Вт/м; $R_{\text{ж}}$ – электрическое сопротивление жилы переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м; R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} , R_{T4} – тепловые сопротивления различных слоев конструкции кабеля и окружающей среды на единицу длины, °К·м/Вт; Δ_1 , Δ_2 – отношение общих потерь в металлическом экране и броне к сумме потерь в токопроводящей жиле.

Кроме оценки пропускной способности к задачам мониторинга теплового режима относят оценку температуры жилы в режиме реального времени и предупредительное (превентивное) устранение токовых перегрузок КЛ [6, 7]. Для выполнения этих задач требуется производить расчёты температуры в динамике, а для своевременного предотвращения токовых перегрузок требуется прогнозирование температур жил кабелей в режиме реального времени. Последнее означает, что необходимо постоянно прогнозировать нагрев кабелей на некоторое время вперёд, причем такое, чтобы была возможность принять меры по снижению нагрузки КЛ.

Получение аналитического решения уравнения (2) в динамике возможно при некоторых допущениях либо для простых частных случаев. При этом окончательные решения получаются громоздкими и содержат цилиндрические функции. Например, Холодный С.Д. в работе [8] решал задачу расчёта нагрева однофазного одиночного кабеля, проложенного в грунте. Поверхность грунта считалась изотермической, а кабель считался тонкостенной трубкой радиусом r_k . Для границы между кабелем и грунтом было записано уравнение теплового баланса:

$$-2\pi\lambda_{\text{гр}}r_k \frac{\partial T}{\partial r} = Q_k, \quad (3)$$

где Q_k – тепловые потери в кабеле, Вт/м; $\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К).

В результате математических преобразований была представлена формула для расчёта температуры в произвольной точке грунта, которая имеет следующий вид:

$$T(t) = \frac{Q_k}{2\pi\lambda_{\text{гр}}} \left[\ln \frac{d'}{d} - \int_0^{\infty} \frac{J_0(x) - J_0\left(\frac{d'}{d}x\right)}{x} e^{-\frac{a}{d^2}x^2t} dx \right], \quad (4)$$

где d и d' – расстояния от рассматриваемой точки до центра кабеля и до центра его зеркального изображения соответственно, м; J_0 – цилиндрическая функция первого рода нулевого порядка.

Если вместо d подставить радиус кабеля r_k и вычислить соответствующее расстояние до изображения, то получим формулу для температуры на поверхности кабеля. Но для оценки теплового режима кабеля необходимо знать температуру жилы, которая будет значительно отличаться от температуры поверхности из-за низкой теплопроводности полиэтилена.

В другом подходе кабель считали бесконечно тонким линейным источником тепла, тогда решение уравнения (2) позволяет определять температуру на поверхности кабеля с помощью интегральной показательной функции

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-v}}{v} dv. \quad (5)$$

Формула для температуры на поверхности одиночного кабеля, проложенного на глубине h в грунте, имеет следующий вид:

$$T_k(t) = T_0 + Q_k \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{сп}}} \left[-Ei\left(-\frac{D_k^2}{16\alpha t}\right) + Ei\left(\frac{h^2}{\alpha t}\right) \right] \quad (6)$$

где D_k – внешний диаметр кабеля, м.

Предложение о расчете температуры на поверхности кабеля с помощью экспоненциального интеграла было реализовано в [9], где перепад температур между поверхностью кабеля и поверхностью грунта рассчитывали с помощью теории [10], а перепад температуры между жилой и внешней оболочкой, как и в [11], рассчитывали с помощью тепловой схемы замещения. Но расчёт её параметров выполняют с помощью метода Ван-Вормера. Так как тепловая волна от жилы и экрана не сразу достигает поверхности кабеля, то для согласования между двумя расчётными областями ввели некоторый коэффициент $\alpha(t)$ («attainment factor»), который предложили определять следующим образом

$$\alpha(t) = \frac{\Delta T_{\text{жк}}(t)}{\Delta T_{\text{жк}}(\infty)}, \quad (7)$$

где $\Delta T_{\text{жк}}$ перепад температур между поверхностью жилы и внешней поверхностью кабеля.

Результирующая формула для расчёта температуры жилы однофазного кабеля в КЛ имеет следующий вид:

$$T_{\text{жк}}(t) = \Delta T_{\text{жк}} + \alpha(t)T_{\text{к}}(t) + \alpha(t)T_{\text{мл}}(t). \quad (8)$$

В [12] авторы выполнили расчёт температуры жилы в режиме реального времени на основе данных о токовой нагрузке жилы и температуре в экране. Затем сопоставили результаты расчёта с экспериментальными данными. Измерения тока

жилы и температуры экрана производили с интервалом 15 минут в течение суток. В расчётах учитывался тепловой поток от жилы $Q_{ж}$ и тепловой поток, обусловленный изменением температуры металлической оболочки (экрана) $\Delta T_{э}$. Учёт влияния однократных ступенчатых скачков тока жилы ($\Delta I_{ж} = I_{ж1} - I_{ж0}$) и температуры экрана $\Delta T_{э}$ на изменение температуры жилы производили по следующей формуле:

$$(T_{ж} - T_{э})_t = Q_{ж0} R_{Tu} + \Delta Q_{ж} R_{Tu} \left(1 - e^{-\frac{1}{c_1 R_{Tu}} t}\right) + \Delta T_{э} \left(1 - e^{-\frac{1}{c_1 R_{Tu}} t}\right), \quad (9)$$

где $Q_{ж0} = I_{ж20} R_{ж}$ – значение теплового потока жилы до скачка ток на величину; $\Delta Q_{ж} = (I_{ж21} - I_{ж20}) R_{ж}$ – изменение теплового потока от жилы за счёт $\Delta I_{ж}$, $R_{ж}$ – электрическое сопротивление жилы переменному току без учёта теплового коэффициента сопротивления.

Для расчёта величины $(T_{ж} - T_{э})$ с учётом постоянно изменяющихся тока жилы и температуры экрана авторы [13] представили их в виде ступенчатого графика. Влияние каждого скачка тока и температуры экрана учитывали с помощью формулы (9). В итоге расчётная формула для текущего момента времени получилась в виде суммы слагаемых, учитывающих предыдущие скачки тока.

В работе [14] с помощью такого же метода предлагают вычислять превышенные температуры поверхности кабелей над температурой окружающей среды. В результате текущую температуру на поверхности одиночного кабеля определяют согласно приведенным выражениям:

$$T_k(t) = T_0 + \sum_{i=1}^m F_1(t, i) - \sum_{i=1}^{m-1} F_2(t, i);$$

$$F_1(t, i) = Q_k(i) \frac{1}{2\pi\lambda_{cp}} \left[-Ei\left(-\frac{D_k^2}{16\alpha(t-t_{i-1})}\right) + Ei\left(-\frac{h^2}{\alpha(t-t_{i-1})}\right) \right]; \quad (10)$$

$$F_2(t, i) = Q_k(i) \frac{1}{2\pi\lambda_{cp}} \left[-Ei\left(-\frac{D_k^2}{16\alpha(t-t_{i-1})}\right) + Ei\left(-\frac{h^2}{\alpha(t-t_{i-1})}\right) \right];$$

где m – число шагов, предшествующих текущему моменту времени t , которые соответствуют ступенчатому графику тепловыделения в кабеле $Q_{k,i}$.

С развитием теории, а также появлением совершенно новых информационных технологий в последние годы специалистами было предложено решение для задачи прогнозирования величины нагрузки нетрадиционными методами, а именно, решение задачи прогноза с использованием различных моделей на основе специальных экспертных систем и ИНС [1, 15].

Прогнозирование термических процессов в СКЛ. Обычно процесс проведения операции прогнозирования [17, 18] какого-либо необходимого исследователю параметра какой-либо системы, выполняется самим оператором или экспертом на величину шага скользящего окна по всей обучающей выборке для данной нейронной сети [19]. При всем этом качество такого проводимого исследователем долгосрочного прогноза обычно приводит к значительному ухудшению получаемых результатов прогноза температуры с ростом числа проводимых итераций процесса прогноза температуры жилы кабеля (как при увеличении временного периода прогноза нагрузки).

Чтобы иметь возможность решить возникшую в ходе исследовательской работы проблему ухудшения долгосрочного прогноза величины нагрузки, было предложено установить в системе прогнозирования в качестве меры оценки качества прохождения процесса обучения сети не возникающее отклонение в прогнозе рассматриваемой величины температуры центральной жилы на величину лишь одного шага скользящего окна по всей длине обучающей выборки для данной ней-

ронной сети, а использовать все суммарное возникающее в процессе прогноза температуры жилы СКЛ отклонение значений температуры жилы кабеля по всем значениям обучающей выборки данной ИНС, причем с получением все новых значений прогнозируемой величины температуры жилы СКЛ на основе того прогноза, который был получен в результате прогноза на предыдущем шаге и производить дальнейший прогноз температуры.

Предложенный нейросетевой алгоритм, выполняющий прогнозирование характеристик электрической изоляции СКЛ, основанный на методе скользящего окна для прогнозирования временных рядов, был апробирован на контрольной выборке экспериментальных данных, не входящих в состав выборки для обучения ИНС. Результаты проведенного прогноза показывают эффективность выбранной модели.

Внедрение систем с использованием температурного мониторинга позволит в режиме онлайн отслеживать состояние каждой КЛ, в том числе ее реальную пропускную способность. Исследования показывают, что по проводам можно пропускать значительно больше тока, не превышая при этом допустимой температуры провода. Комплексное решение температурного мониторинга поможет оперативно контролировать текущее состояние СКЛ и оптимизировать использование их реальной пропускной способности.

Адаптивный метод прогнозирования. Для увеличения эффективности и надежности работы НК прогнозирующих систем в стремительно изменяющихся условиях неполной информации возможно применение адаптивных НК моделей прогнозирования. Подобные прогнозирующие НК модели отражают текущие свойства динамического ряда и способны непрерывно, в процессе реального времени учитывать эволюцию динамических характеристик, изучаемых процессов. Данные методы базируются на само корреляционных нейросетевых моделях, которые учитывают результаты прогнозов данных, сделанных на предыдущем шаге. Подобная НК модель прогнозирования постоянно впитывает новую и новую информацию, быстро приспосабливается к ней, в связи с чем эффективно отражает тенденцию развития, существующую в данный момент в прогнозируемом ряде данных. Поэтому подобные прогнозирующие модели удобно использовать в НК прогнозирующих системах на базе различных нейронных сетей. Адаптивный метод осуществляет последовательный во времени расчет прогнозируемого показателя с учетом сложившейся на момент прогнозирования тенденции и использующие в явном виде некоторый механизм приспособления модели к новым условиям, который позволяет учитывать различную информационную ценность уровней временного ряда и результат реализации прогноза, сделанного на предыдущем шаге. К адаптивным методам относят: методы скользящих и экспоненциальных средних, метод гармонических весов, методы авто регрессионных преобразований.

Таким образом, сравнительный обзор неразрушающих методов прогнозирования термических процессов в СКЛ показал, что большинство методов обладают высокой степенью сложности и большим количеством необходимых вычислительных операций для получения необходимых данных прогноза термических процессов в СКЛ, кроме того использование в данных методиках различных схем замещения в совокупности с большим объемом математических операций расчета с большой вероятностью приведет к значительной погрешности расчетных значений температур СКЛ по отношению к фактическим.

Кроме того, столь большой объем вычислительных операций значительно затрудняет возможность работы рассмотренных методов прогноза в режиме реального времени, что является существенным недостатком. Применение ИНС в частности НК является наиболее перспективным решением, так как данные технологии способны в режиме реального времени с высокой степенью параллельности обрабатывать значительные объемы данных.

Нейрокомпьютерная система прогнозирования пропускной способности СКЛ

Критерии производительности НК системы. Существует ряд некоторых характеристик, последующая оценка которых позволит определить, насколько эффективно работает НК система прогнозирования пропускной способности СКЛ. Среди них наиболее значимыми являются: точность НК системы при прогнозировании, стоимость разработки и последующего внедрения подобной нейрокомпьютерной системы, результирующая польза от внедрения разработанной НК системы, показатели стабильности работы и степени отзывчивости НК системы в процессе эксплуатации. В процессе прогнозирования зачастую возникает некоторая ошибка. По величине данной ошибки и определяется точность метода, который используется для прогнозирования пропускной способности СКЛ.

Также для оценки используемых методов прогнозирования необходимо прибегать к так называемой симуляции работы. Данный метод базируется на ретроспективном использовании исторических данных, а ошибка, которая возникает в процессе симуляции позволит сравнивать эффективность работы различных методов. Определены критерии для оценки производительности НК системы прогнозирования пропускной способности СКЛ к которым относятся: точность прогнозирования, стоимость системы, результирующая польза, свойства стабильности и отзывчивости.

Аппаратная реализация нейрокомпьютера. По возможностям построения нейросетей для решения ряда задач прогнозирования нейрочипы можно подразделить на: нейрочипы с жесткой и переменной нейросетевой структурой (т.е. нейрочипы в которых топология нейронных сетей может быть реализована жестко или гибко). Кроме того, также имеются и нейрочипы с переменной (гибкой) структурой, которые дают пользователю возможность задавать необходимую для конкретных задач структуру ИНС как, программными так и аппаратными средствами. Классификация нейрочипов, которые могут быть использованы при решении задач прогнозирования и анализа данных приведена на рис. 1.

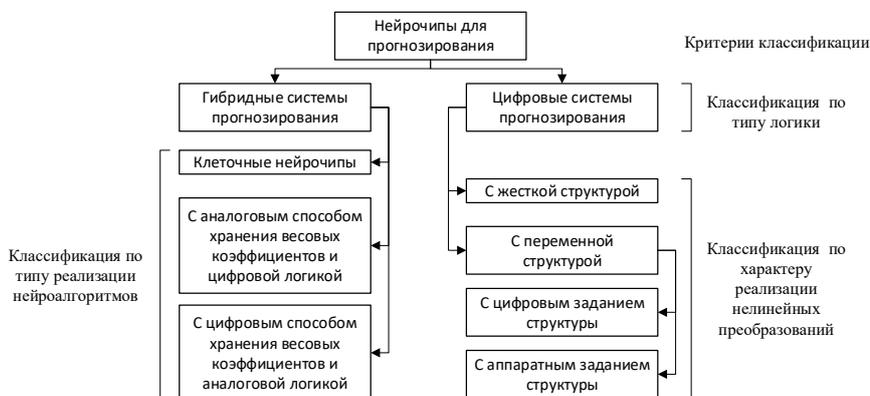


Рис. 1. Классификация нейрочипов для решения задач прогнозирования

Таким образом, для решения задачи прогнозирования термических процессов СКЛ принято решение использовать цифровой нейрочип с переменной структурой из-за их высокой производительности по сравнению с потребляемой мощностью, высокой степенью универсальности. Преимуществом выбранного нейрочипа NeuroMatrix NM6404 являются сочетание относительно высокой производительности по сравнению с потребляемой мощностью. Также имеется возможность для расширения и построения многопроцессорной системы.

Производительность нейросетевой архитектуры. К достоинствам использования ИНС можно отнести возможность так называемого факторного прогнозирования. Повышению точности прогноза способствует подача на вход вместе с предысторией температуры токоведущей жилы других значимых факторов (температура, величина тока жилы и др.). При этом нейросеть самостоятельно определяет зависимости между факторами и важность каждого из них, корректируя свои параметры в процессе обучения. Для решения задачи с помощью ИНС необходимо выбрать конфигурацию нейронной сети и сформировать окружение, в котором будет работать данная нейронная сеть. Под процессом формирования окружения нейронной сети понимается реализация следующих этапов: • создание обучающего задачника; • обучение ИНС; • тестирование полученной конфигурации ИНС.

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

$$Y_t = f(X_{t-n}, T_{t-n}, N_t) + \xi_t,$$

где X_t – фактическое значение температуры жилы в момент времени t ; t – текущее время; W_{t-n} – предшествующие наблюдения температуры жилы, T_{t-n} – предшествующие наблюдения температуры окружающей среды; n – индекс ретроспективы данных; I_t – Величина действующего тока ($I_{\min} < I < I_{\max}$); ξ_t – случайная составляющая, представляющая.

Для определения эффективности исследуемых нейронных сетей использовалась среднеквадратичная ошибка, усредненная по количеству выходных переменных нейронной сети и рассчитываемая на основе прогнозируемых и реальных значений тестовой выборки по формуле:

$$E = \frac{1}{N * K} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N (y_{ij}^{real} - y_{ij}^{прогн})^2, \quad (11)$$

где y_{ij}^{real} – значение i -й выходной переменной нейронной сети для j -го обучающего или тестового примера; $y_{ij}^{прогн}$ – прогнозируемое значение i -й выходной переменной нейронной сети для j -го обучающего или тестового примера; N – количество примеров в обучающей или тестовой выборке; K – количество выходных переменных нейронной сети.

При создании модели, опираясь на результаты расчета среднеквадратичной ошибки, был осуществлен выбор оптимальной конфигурации нейронной сети для поставленной задачи. Выбран алгоритм обучения методом Левенберга-Марквардта, и каскадная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки с 10 нейронами. Проведено сравнение архитектур нейронной сети. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таким образом, из рассмотренных ИНС самую высокую точность имеет многослойный персептрон (рис. 2); на втором месте находится обобщенно-регрессионная нейронная сеть; самой низкой точностью обладает нелинейная авторегрессионная сеть. Для решения задачи прогнозирования ресурса СКЛ была выбрана сеть с прямым распространением данных и обратного распространения ошибки рис. 2 Feed-forward backprop, т.к. сети такого типа в совокупности с активационной функцией в виде гиперболического тангенса ($f(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$) являются в некоторой степени универсальной структурой для многих задач аппроксимации, приближения и прогнозирования. Сравнение графиков температур в зависимости от архитектуры ИНС представлены на рис. 2.

Таблица 1

Сравнение производительности нейросети

№ п. п	Тип нейронной сети	Средняя ошибка прогноза ε , °С
1	Многослойный перцептрон (MLP) / Multilayered perceptron (MLP)	0,9
2	Рекуррентная нейронная сеть (Layer recurrent)	1,2
3	Каскадная сеть прямого распространения (Cascade forward backpropagation)	1,63
4	Сеть Эльмана с обратным распространением ошибки (Elman backpropagation)	2,14
5	С запаздыванием и обратным распространением ошибки (backpropagation with delay)	2,75

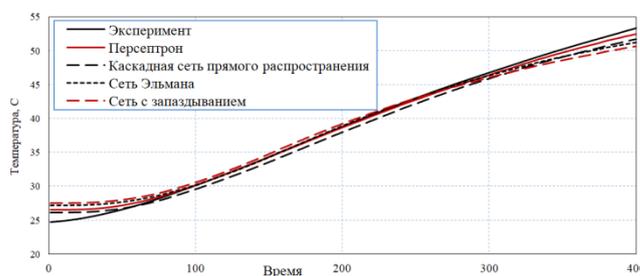


Рис. 2. Сравнение графиков температур в зависимости от архитектуры ИНС

Таким образом, для решения поставленной задачи прогнозирования термических процессов в СКЛ были определены основные параметры конфигурации ИНС для реализации НК системы прогнозирования температуры СКЛ, позволяющий проводить долгосрочный прогноз температур СКЛ без увеличения погрешности при увеличении дальности прогноза.

Алгоритмическая и программная разработка нейрокомпьютерной системы

Разработка нейрокомпьютерной системы. Для проверки эффективности и корректности работы выбранного метода прогнозирования термических процессов в СКЛ необходимо собрать данные о рабочих температурах исследуемого образца СКЛ, составить обучающую выборку из ретроспективных данных температур исследуемого образца СКЛ, составить нейрокомпьютерную модель для прогнозирования термических процессов СКЛ, провести прогнозирование термофлуктуационных процессов, обработать результаты прогнозирования. Структурная схема нейрокомпьютерной системы для прогнозирования термических процессов СКЛ представлена на рис. 3.

Для решения задачи автоматизации прогнозирования температуры СКЛ посредством использования нейрокомпьютерной системы прогнозирования, был разработан алгоритм работы адаптивной системы прогнозирования температуры СКЛ. Алгоритм работы адаптивной системы прогнозирования температуры СКЛ приведен на рис. 4.

Адаптивный алгоритм работы НК-системы прогнозирования температуры СКЛ поэтапно работает следующим образом:

Блок 1 – ввод базы данных для обучения. Загрузка входных параметров, таких как температура защитной оболочки ($\theta_{з.о}(n)$), действующий ток жилы ($I_{ж}$), номер образца кабеля (N_k) из базы данных «действующих токов и температур СКЛ» для последующего обучения создаваемых нейросетей.

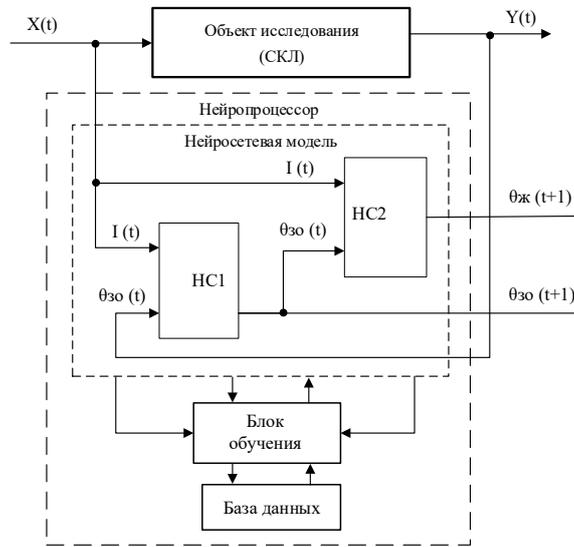


Рис. 3. НК система прогнозирования термических процессов

Блок 2 – Задание основных параметров для создания НС, а именно определение диапазона значений основных параметров сети для последующего их создания таких как количества нейросетей, которое будет создано в рамках процесса обучения (Count) таких как:

- ◆ минимального и максимального количества скрытых слоев в создаваемых сетях (N_h);
- ◆ минимального и максимального количества нейронов в скрытых слоях, создаваемых НС (N_n);
- ◆ функций активации нейронов в создаваемых нейросетях (F_t);
- ◆ алгоритма обучения нейросети (T_f);
- ◆ желаемая точность прогнозирования (α).

Блок 3 – Подбор оптимальной конфигурации НС. На основании ранее заданных параметров, а именно, количество скрытых слоев, количество нейронов в скрытых слоях, функции активации нейронов, алгоритма обучения сети для достижения наибольшей точности прогнозирования производится построение и перебор всех возможных комбинаций архитектур нейросетей. Начинается циклический процесс оптимизации конфигурации сети по количеству скрытых слоев, количеству нейронов в скрытых слоях, функции активации нейронов.

Блок 5-7 – Адаптация НС ко входным данным. Начинается циклический процесс оптимизации конфигурации сети по количеству скрытых слоев, количеству нейронов в скрытых слоях, функции активации нейронов. На первом шаге каждого цикла задается минимальное значение для каждого из параметров, которое определяется из минимального значения на этапе задания параметров (блок 2). С помощью циклов происходит перебор возможных конфигураций НС для получения конфигурации, обладающей наибольшей производительностью (высокая точность прогнозирования).

Блок 8 – Обучение и оценка производительности НС. Оценка производительности сети определяется по величине погрешности при прогнозировании температур СКЛ. Для каждой из полученных комбинаций количества скрытых слоев, нейронов и функций активаций производится обучение сети, тестирование качества прогнозирования и оценка производительности. Обучение сети происходит по

алгоритму обратного распространения ошибки (Backpropagation). Он является одним из основных способов обучения и содержит в своей основе алгоритм вычисления градиентного спуска.

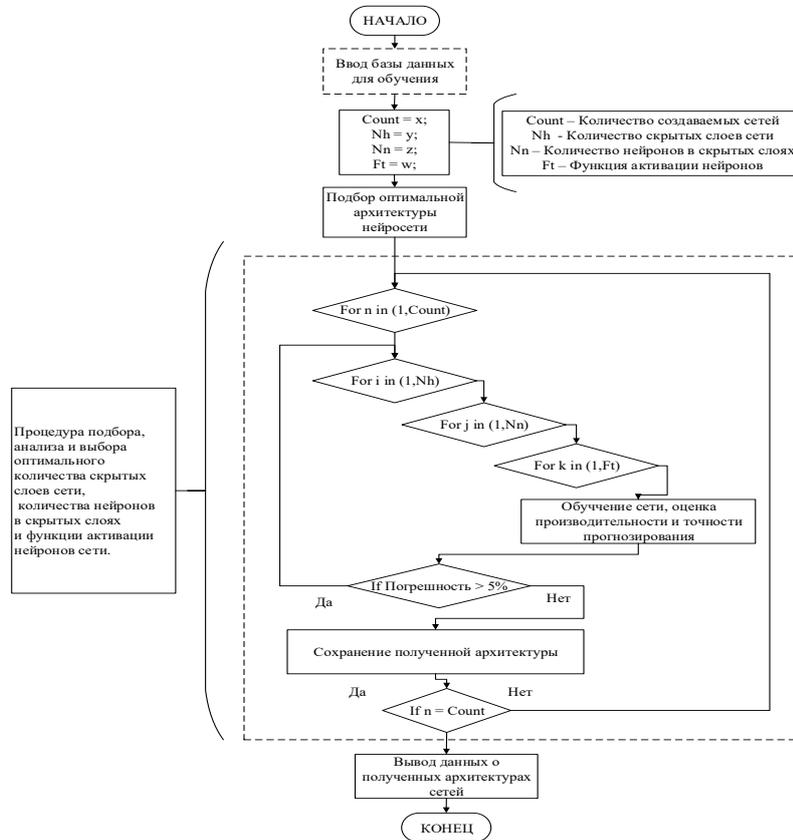


Рис. 4. Алгоритм работы адаптивной системы прогнозирования температуры СКЛ

Блок 9 – расчет среднеквадратичной (MSE) величины погрешности прогнозирования температур СКЛ. В случае, если точность прогнозирования полученной архитектуры больше заданного уровня (погрешность $>5\%$), полученная архитектура отсеивается, процесс переходит к проверке следующей конфигурации. Если точность прогнозирования соответствует заданным параметрам (погрешность $<5\%$), полученная конфигурация нейросети сохраняется (блок 10) в памяти (Внешнее ЗУ) для последующей работы.

Блок 4, 11 – проверка количества полученных конфигураций НС. Процесс создания и обучения будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто заданное количество созданных конфигураций нейросетей (Count) по заданным критериям. Это сделано для экономии времени и аппаратных ресурсов, так как алгоритмом может быть найдено большое количество подходящих конфигураций, имеющих между собой незначительные отличия в конфигурации.

Блок 12 – оценка полученных результатов и выбор наиболее производительной конфигурации НС. Если в процессе работы было создано необходимое количество нейросетевых архитектур, процесс создания и обучения останавливается, из полученных комбинаций нейросетей выбирается одна наиболее производительная (по критерию точности прогнозирования) и уже с ней ведется дальнейшая работа.

Цифровое аппаратное устройство. Для снятия данных о температурных режимах СКЛ [20] использовалось специализированное цифровое аппаратное устройство (рис 5), позволяющее: – в режиме on-line проводить послыйный мониторинг термических процессов исследуемого образца СКЛ; – в режиме on-line проводить мониторинг температуры окружающей среды, оказывающей влияние на термические процессы исследуемого образца СКЛ; – передавать данные через СОМ-порт на компьютер для обработки и анализа оператором данных о протекании термических процессов в СКЛ; – передавать данные через последовательный порт на нейровычислитель для последующего прогнозирования термических процессов в СКЛ.



Рис. 5. Цифровое аппаратное устройство исследования термических процессов

Система позволяет осуществлять мониторинг режимов работы КЛ на основании анализа профиля рабочих температур слоев изоляции. [5] и решать задачи раннего выявления, возникающих в нем повреждений.

Структурная схема НК системы. Структурная блок-схема материнской платы, на которой базируется разрабатываемая нейрокompьютерная система прогнозирования термических процессов СКЛ приведена на рис. 6.

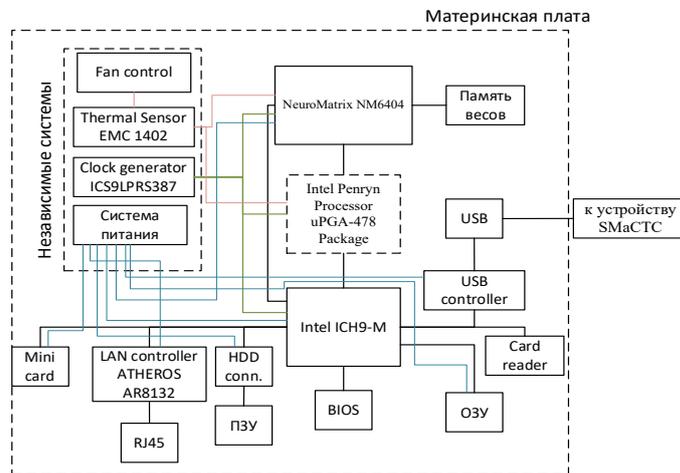


Рис. 6. Блок-схема нейрокompьютерной системы прогнозирования

Рассмотрим схемную реализацию схемы (рис.6) материнской платы нейрокompьютерной системы прогнозирования термических процессов СКЛ. Электрическая схема системы управления (RTL8211E-VB-CG) НК системы исследования термических процессов обеспечивает работу и управление всех компонентов НК

системы, расположенных на материнской плате. Отвечает за связь и обмен информацией между процессорами (Intel Penryn и NeuroMatrix 6404), внутренней и внешней памятью, обработку данных, получаемых с внешних портов подключения. Процессор Intel Penryn является вспомогательным процессором для нейρο-процессора NeuroMatrix 6404. Так как на плате имеется LAN-порт, имеется возможность создания автономной системы. Кроме того, дополнительно имеется температурное управление (EMC 1402) и защита процессоров от перегрева. За это отвечают контакты CPUPWRGND (-) и THRMTRIP (+) ответственный за контроль температуры процессора в процессе работы. При создании автономной системы прогнозирования термических процессов СКЛ может потребоваться графический пользовательский интерфейс. Так как в процессоре системы имеется встроенное видео ядро имеется возможность контроля, потребляемого им мощности посредством модуля PEG.

Экспериментальные исследования

Прогнозирование термических процессов в СКЛ. При прогнозировании температуры жилы кабеля создание, обучение и моделирование нейронной сети осуществлялось с помощью специализированного программного пакета NNT в исследовательской системе Matlab. Проведено исследование протекания термофлуктуационных процессов в исследуемом силовом кабеле марки АПв Пу г-1х240/25-10 происходящее при реальной диаграмме действующего значения тока жилы силового кабеля, и разработанной нейронной модели для прогноза, произведенной с использованием метода ИНС на глубоких [16] ретроспективных данных температур исследуемого кабеля за 2015-2019 годы. Данные по температуре $\theta_{з.о.}$, $\theta_{о.с}$ –защитной оболочки, окружающей среды, получены в ходе работы с реальными образцами силового кабеля АПв Пу г-1х30/25-10. Для составления обучающей выборки бралось по 2000 точек температуры $\theta_{з.о.}$, $\theta_{о.с}$. Далее приведены результаты прогноза температуры жилы кабеля ($\theta_{ж}$), с помощью адаптивного алгоритма, для исследуемых образцов СКЛ.

Проверка результатов прогнозирования термофлуктуационных процессов в СКЛ (табл.2) показала, что средняя ошибка прогноза температуры жилы кабеля $\theta_{ж}$ при различных токах жилы не превышает 3 %, что свидетельствует о возможности применения метода ИНС для целей прогнозирования температуры жилы кабеля по температуре на поверхности $\theta_{з.о.}$

Таблица 2

Погрешность прогнозирования нейросети

№ исследуемого образца	Средняя ошибка прогноза ϵ , °С,	Средняя ошибка прогноза ϵ , %
Образец кабель № 7	1,34	2,79 %
Образец кабель № 8	1,29	1,82 %
Образец кабель № 11	1,08	1,93 %
Образец кабель № 12	1,47	1,68 %

Построены графики экспериментальной температуры исследуемых образцов и графики, построенные на основе данных обучающей выборки и нейросети на основе целевых и полученных данных для анализа погрешности нейросети при расчетах.

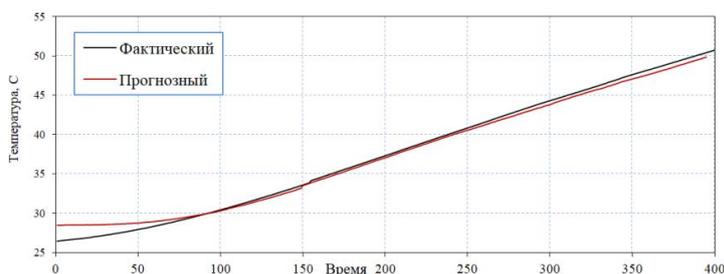


Рис. 7. График экспериментальной температуры образца №1 и график, построенный на основе данных обучающей выборки и нейросети. (Прогнозный и фактический график)

Таким образом, использование специализированного цифрового аппаратного устройства исследования термических процессов [1] позволяет проводить мониторинг внутренних температур исследуемого образца СКЛ в режиме реального времени, при этом не разрушая защитную оболочку СКЛ. Для прогнозирования температурных режимов СКЛ была разработана искусственная нейросеть для определения текущего температурного режима для токоведущей жилы силового кабеля. При анализе полученных данных было определено, что максимально достигнутое отклонение данных, полученных от нейросети в ходе эксперимента от данных в составе обучающей выборки, составило менее 3% что является вполне приемлемым для данного исследования результатом. Разработанная адаптивная НК модель позволяет проводить оценку текущего состояния изоляции и прогнозировать остаточный ресурс СКЛ.

Проверка метода на состаренных образцах СКЛ. Для полноценной проверки эффективности использования метода скользящего окна для прогнозирования термических процессов СКЛ необходимо провести прогнозирование термофлукуационных процессов не только для исправных, но и для состаренных образцов силовых кабельных линий. Результаты прогнозирования для состаренных образцов СКЛ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Этапы прогнозирования термических процессов в СКЛ

№ исследуемого образца кабеля	Ток жилы кабеля	Время старения t, час	Средняя температура жилы кабеля		Ошибка прогноза температуры, t°C
			Эксперимент, t°C	Прогноз, t°C	
1 этап – новый кабель	480	–	33,97	34,32	-0,35
2 этап – состаренный кабель	480	8	35,65	38,62	-2,96

Исследуемые образцы кабеля искусственно состаривались при одной и той же температуре, но при различном времени выдержки в термощкафу. Анализ результатов показал, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом.

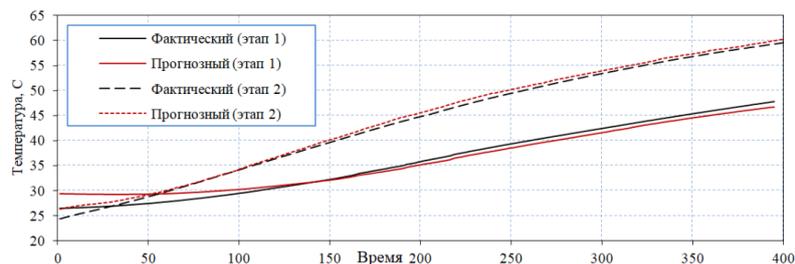


Рис. 8. График изменения температур (экспериментальных и прогнозируемых) для 4-го кабеля до (1 этап) и после состаривания (2 этап)

Анализ полученных результатов по прогнозированию изменения технического состояния изоляции СКЛ в условиях эксплуатации с использованием результатов эксплуатационного мониторинга [5] показал, что использование метода скользящего окна для прогнозирования термических процессов в СКЛ позволяет повысить эффективность эксплуатации кабельных систем. Исследуемые образцы кабеля искусственно состаривались при одной и той же температуре, но при различном времени выдержки в термошкафу. Анализ результатов показал, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом. С увеличением времени состаривания возрастает и разность температур между исходным и состаренным образцом. Погрешность прогноза нейросетью при измененном уровне рабочих температур не увеличивалась.

Заключение. Проведен сравнительный обзор существующих на данный момент традиционных неразрушающих методов прогнозирования термических процессов в силовых кабельных линиях. Для решения задачи прогнозирования решено: – использовать НК систему прогнозирования, базирующиеся на методах искусственных нейронных сетей (ИНС); – выбрана НК с прямым распространением данных и обратного распространения ошибки, представляющая собой многослойный персептрон; – выбрана активационная функция в виде гиперболического тангенса. Произведен обзор и выбор алгоритмов обучения и корректировки весовых коэффициентов (алгоритм Ливенберга-Марквардта). Разработан алгоритм работы адаптивной НК системы прогнозирования термических процессов СКЛ, позволяющий посредством адаптивного метода прогнозирования: – определять количество входных и выходных элементов ИНС, определено количество скрытых слоев ИНС; – рассчитывать количество нейронов в скрытых слоях, проведено сравнение и выбор активационных функций нейронов ИНС. Разработана функциональная модель НК системы для определения температурных режимов токоведущей жилы силовой кабельной линии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
2. Шурыкин А.А., Полуянович Н.К. Оценка математического ожидания ресурса изоляции в задачах повышения надежности электрооборудования // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. (53). – С.16.
3. Neher J.H. McGrath M.H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems // AIEE Transactions. – 1957. – Vol. 76. – Part 3. – P. 755-772.
4. Anders G.J. Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
5. Sellers S.M., Black W.Z. Refinements to the Neher-McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 12-30.

6. *Лавров Ю.А.* Кабели высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Требования экономичности, надежности, экологичности // *Новости электротехники.* – 2008. – № 2.
7. *Лавров Ю.А.* Системный подход к проектированию воздушных и кабельных линий электропередачи среднего и высокого напряжения // *Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научнотехнический прогресс: Матер. III российской научно-практической конференции с международным участием.* – Новосибирск, 2008. – С. 17-27.
8. *Холодный С.Д.* Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле // *Электричество.* – 1964. – № 6. – С. 35-40.
9. *Morello A.* Variazioni Transitorie di Temperatura Nei Cavi per Energia // *L'Elettrotecnica.* – 1958. – Vol. XLV, No. 4. – P. 213-222.
10. *Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C.* Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications. – New York: McGraw-Hill, 1954.
11. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic Ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function // *Electra.* – 1972. – No. 24. – P. 63-69.
12. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* – 1981. – Vol. PAS-100, No. 1. – P. 211-219.
13. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
14. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // *IEEE Transactions on Industry Applications.* – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
15. *Короткевич М.А., Курачинский В.В.* Прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы на следующие сутки с использованием метода искусственных нейронных сетей. – Белорусский национальный технический университет, 2009.
16. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пшихонов В.Х.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
17. *León, F., Anders G.J.* Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 2008. – Vol. 23, No. 2. – P. 537-543.
18. *Li H.J.* Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating // *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.* – 2005. – Vol. 152, No. 6. – P. 849-854.
19. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурьков Д.В.* Нейросетевая многоэтапная система прогнозирования ресурса силовой кабельной линии // *Математические методы в технологиях и технике.* – 2021. – № 11. – С. 20-26.
20. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Управление пропускной способностью кабельной сетью на основе интеллектуально-информационных технологий // *Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Матер. V Международной научно-технической конференции.* – Чебоксары, 2021. – С. 122-127.

REFERENCES

1. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems]. Rostov-on-Donu; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
2. *Shurykin A.A., Poluyanovich N.K.* Otsenka matematicheskogo ozhidaniya resursa izolyatsii v zadachakh povysheniya nadezhnosti elektrooborudovaniya [Estimation of the mathematical expectation of the insulation resource in problems of increasing the reliability of electrical equipment], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, No. 2. (53), pp. 16.
3. *Neher J.H. McGrath M.H.* Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems, *AIEE Transactions*, 1957, Vol. 76, Part 3, pp. 755-772.
4. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.

5. *Sellers S.M., Black W.Z.* Refinements to the Neher-McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 12-30.
6. *Lavrov Yu.A.* Kabeli vysokogo napryazheniya s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena. Trebovaniya ekonomichnosti, nadezhnosti, ekologichnosti [High voltage cables with insulation made of cross-linked polyethylene. Requirements of economy, reliability, environmental friendliness], *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2008, No. 2.
7. *Lavrov Yu.A.* Sistemnyy podkhod k proektirovaniyu vozduzhnykh i kabel'nykh liniy elektroperedachi srednego i vysokogo napryazheniya [System approach to the design of overhead and cable power transmission lines of medium and high voltage], *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchnotekhnicheskii progress: Mater. III rossiyskoy nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Power transmission lines 2008: design, construction experience of operation and scientific and technical progress: Materials of the III Russian scientific and practical conference with international participation]. Novosibirsk, 2008, pp. 17-27.
8. *Kholodnyy S.D.* Nagrevanie i okhlazhdenie kabelya, prolozhennogo v zemle [Heating and cooling of a cable laid in the ground], *Elektrichestvo* [Electricity], 1964, No. 6, pp. 35-40.
9. *Morello A.* Variazioni Transitorie di Temperatura Nei Cavi per Energia, *L'Elettrotecnica*, 1958, Vol. XLV, No. 4, pp. 213-222.
10. *Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C.* Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications. New York: McGraw-Hill, 1954.
11. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic Ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function, *Electra*, 1972, No. 24, pp. 63-69.
12. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 211-219.
13. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
14. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
15. *Korotkevich M.A., Kurachinskiy V.V.* Prognozirovanie elektricheskoy nagruzki energosistemy na sleduyushchie sutki s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting of electrical load power systems for the next day using the method of artificial neural networks]. Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2009.
16. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and forecasting of insulating materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
17. *León, F., Anders G.J.* Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 537-543.
18. *Li H.J.* Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating, *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 2005, Vol. 152, No. 6, pp. 849-854.
19. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Bur'kov D.V.* Neyrosetevaya mnogoetapnaya sistema prognozirovaniya resursa silovoy kabel'noy linii [Neural network multi-stage system for predicting the power cable line resource], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2021, No. 11, pp. 20-26.
20. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Upravlenie propusknoy sposobnost'yu kabel'noy set'yu na osnove intellektual'no-informatsionnykh tekhnologiy [Cable network bandwidth management based on intellectual and information technologies], *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotehniki i energoeffektivnosti: Mater. V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency: Materials of the V International Scientific and Technical Conference]. Cheboksary, 2021, pp. 122-127.

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

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89508609983; кафедра электротехники и мехатроники.

Азаров Николай Васильевич – e-mail: s.t.a.l.k.e.r999@yandex.ru; тел.: 89180242843; 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: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508609983; the department of electric technics and mechatronics.

Azarov Nikolay Vasilyevich – e-mail: s.t.a.l.k.e.r999@yandex.ru; phone: +79180242843; 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 004.056.53

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-103-118

Ю.А. Заргарян, В.И. Кошенский, К.О. Кирсанов, М.С. Пресняков

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH LOW ENERGY ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛЮДЕЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Отслеживание местоположения человека в большой стране, большом городе и даже районе давно стало реальностью. Благодаря спутникам появилась возможность точно узнать, где находится человек. Однако такие технологии в большей степени предназначены для определения местоположения на открытой местности, и их сигнал не способен преодолеть большие железобетонные конструкции, а также стены и перекрытия в здании. В данной работе предлагается решение такой проблемы, рассматривается система контроля перемещения людей в помещениях. Такая система не только определяет положение, где находится человек, с точностью до полуметра, но и создаёт базу данных, в которой отображается, дата, время и место обнаружения человека, а также его идентификация с указанием, кто конкретно был обнаружен. Система, описанная в данной работе, очень проста в понимании и имеет низкую стоимость. Работает она с микроконтроллером ESP32 и основана на базе беспроводной технологии передачи данных Bluetooth Low Energy. Микроконтроллер ESP32 выступает в качестве сканера сигнала с параметром RSSI. Полученные данные, а именно RSSI и уникальный идентификатор, который направлен на определение личности человека, отправляются на сервер ThingSpeak, где рассчитывается расстояние до источника, в качестве которого выступает смартфон, определяя его местоположение и фиксирует перемещение. При этом используются методы повышения точности, такие как алгоритм Fingerprint. Во всем помещении на этапе установки системы собираются «отпечатки» в пределах контролируемой территории, у таких контрольных точек определяются эталонные значения RSSI, именно на их основе и происходит определение местоположения человека. Также в данном материале рассматривается решение задачи идентификации и контроля приближения людей к охраняемому объекту и организация системы сбора и хранения статистики посещения подконтрольного объекта.

Контроль перемещения; микроконтроллер ESP32; BLE; алгоритм Fingerprint; идентификация; контроль приближения; сбор и хранение статистики.

Yu.A. Zargaryan, V.I. Koshensky, K.O. Kirsanov, M.S. Presnyakov

APPLICATION OF BLUETOOTH LOW ENERGY TECHNOLOGY TO CONTROL THE MOVEMENT OF PEOPLE INDOOR

Tracking the location of a person in a big country, a big city, and even an area has long been a reality. Thanks to satellites, it became possible to know exactly where a person is. However, such technologies are more intended for positioning in open areas, and their signal is not able to overcome large reinforced concrete structures, as well as walls and ceilings in a building. This article proposes a solution to this problem, considers the system for controlling the movement of people in the premises. Such a system not only determines the position where a person is located, with an accuracy of half a meter, but also creates a database that displays the date, time and place of a person's discovery, as well as his identification, indicating who exactly was discovered. The system described in this article is very easy to understand and has a low cost. It works with the ESP32 microcontroller and is based on Bluetooth Low Energy wireless data transfer technology. The ESP32 microcontroller acts as a signal scanner with the RSSI parameter. The received data, namely RSSI and a unique identifier, which is aimed at determining the identity of a person, are sent to the ThingSpeak server, where the distance to the source, which is the smartphone, is calculated, determining its location and recording movement. This uses methods to improve accuracy, such as the Fingerprint algorithm. In the entire room at the installation stage of the system, "fingerprints" are collected within the controlled area, reference RSSI values are determined at such control points, and it is on their basis that a person's location is determined. Also, this material discusses the solution of the problem of identifying and controlling the approach of people to a protected object and the organization of a system for collecting and storing statistics on visiting a controlled object.

Movement control; ESP32 microcontroller; BLE; Fingerprint algorithm; identification; proximity control; collection and storage of statistics.

Введение. В современном мире геопозиционирование и геолокация являются повседневной и обыденной задачей для людей. Можно без труда определить своё местоположение с помощью смартфона или иного гаджета. Также несложно построить маршрут и отслеживать своё перемещение в такси, поезде, самолёте или в любом другом транспорте в режиме реального времени.

Но когда речь заходит о контроле перемещения людей внутри помещения, тут сразу возникают определенные трудности, связанные с частичным или полным отсутствием возможности определять точное местоположение внутри здания из-за помех в виде стен или бетонных перекрытий. Также известно, что современные системы контроля и управления доступом зачастую направлены на идентификацию личности по логике системы вход-выход. И такие системы не предоставляют информацию по контролю за перемещением внутри помещения, включая персональную идентификацию. Осуществление подобного контроля является важной задачей для целого ряда направлений таких как [1–3]:

1. Контроль за перемещением людей на режимных объектах и предприятиях.
2. Контроль за посетителями в музеях, на выставках, форумах и многое другое.
3. Задача идентификации и контроля приближения людей к охраняемому объекту.
4. Задача сбора и хранения статистики посещения подконтрольного объекта.

Технологии позиционирования являются одной из самых актуальных тем, поскольку не только связаны с автоматизацией процесса контроля перемещения людей в помещении, но и является весьма перспективным направлением, так как позволяют учитывать почти каждое действие рабочего.

Анализ существующих решений для контроля перемещения людей в помещениях. Перед началом работы были проанализированы существующие решения для контроля перемещения людей в помещениях такие как:

1. Позиционирование на основе технологии RFID.
2. Позиционирование на основе технологии машинного зрения.
3. Позиционирование на основе технологии iBeacon.
4. Позиционирование на основе технологии Wi-Fi.
5. Позиционирование на основе технологии UWB.
6. Позиционирование на основе инфракрасных технологий.
7. Позиционирование на основе технологии ZigBee.
8. Позиционирование на основе ультразвуковых технологий.

Важнейшими критериями, для сравнения технологий, были выбраны следующие [4]:

1. Точность поскольку необходимо выбрать технологию, которая будет обеспечивать максимальную точность позиционирования.
2. Область покрытия, потому что для реализации поставленной задачи важна конкретная площадь.
3. Стоимость, поскольку дорогое оборудование будет проблематично использовать и проводить с помощью него эксперименты.
4. Помехоустойчивость, которая будет обеспечивать стабильную работу оборудования.

Теоретические данные для сравнения технологий представлены в табл. 1, однако требуется проверка параметров на практике.

Таблица 1

Сравнение технологий позиционирования

Технология	Точность	Область покрытия	Стоимость	Помехоустойчивость
RFID	1–5 м	Комната (Кабинет)	Оборудование: высокая; эксплуатация: низкая	Зависит от способа обработки сигнала
Машинное зрение	0.01–1 м	Кабинет (и более)	Высокая	Чувствительна к освещению
iBeacon	0.01–1 м	Комната (Кабинет)	Низкая	Невысокая
Wi-Fi	~1 м	Территория ТЦ	Низкая	Невысокая
UWB	0.1–0.3 м	Здание	Высокая	Высокая
Инфракрасные технологии	~0.2 м	Комната (Кабинет)	Высокая	Невысокая
ZigBee	0.3–1 м	Комната (Кабинет)	Невысокая	Высокая
Ультразвуковые технологии	~0.03 м	Комната (Кабинет)	Высокая	Невысокая

В результате сравнения, было выявлено, что данным выше критериям больше всех удовлетворяет технология iBeacon. Теоретическая область покрытия и помехоустойчивость удовлетворяют заданным требованиям. Данный метод реализуется на основе технологии Bluetooth Low Energy (BLE). Она является одной из самых низко-затратных, наиболее точной, поскольку существуют методы, с помощью которых можно увеличить данный показатель, а именно алгоритм Fingerprint.

Но технология iBeacon имеет ряд недостатков, например, открытый эфир вещания сигнала, что упрощает взлом системы, а также высокая стоимость и невозможность быстро заменить маячок. Поэтому при реализации данной работы было решено не использовать готовое решение, а разработать своё на базе микроконтроллера ESP32 с использованием технологии Bluetooth Low Energy (BLE). Микроконтроллер имеет низкую стоимость и исключает недостатки маячков iBeacon [1].

Общие сведения о микроконтроллере ESP32. Bluetooth – производственная спецификация беспроводных персональных сетей, одна из наиболее популярных технологий для связи устройств. Bluetooth обеспечивает обмен информацией между такими устройствами, как персональные компьютеры, мобильные телефоны, планшеты, принтеры, цифровые фотоаппараты, мыши, клавиатуры, джойстики, наушники, гарнитуры и акустические системы, в датчиках, бытовой электронике, медицинских приборах и так далее, на надёжной, бесплатной, повсеместно доступной радиочастоте для ближней связи. Bluetooth позволяет этим устройствам общаться, когда они находятся друг от друга в радиусе около 100 м в старых версиях протокола и до 1500 м начиная с версии Bluetooth 5. Дальность сильно зависит от преград и помех, даже в одном помещении. Bluetooth позволяет работать как в режиме «точка-точка», так и в режиме «звезда». Тем не менее, этот стандарт чаще всего используется для обмена информацией между двумя устройствами [2, 3].

Для примера был рассмотрен микроконтроллер ESP32, отличительная черта которого – наличие двух интегрированных модулей Bluetooth: стандартного Bluetooth и Bluetooth Low Energy (BLE). Модуль BLE потребляет значительно меньше энергии, относительно стандартных классических протоколов Bluetooth. Экономия энергии достигается за счёт того, что информационные пакеты отправляются периодически, по мере необходимости [4]. Данный тип обмена данными не поддерживает обмена файлами. Например, музыку или видео передать не получится. Модули BLE могут использоваться для идентификации типов устройств, обмена информацией со смарт часами, GPS трекерами, фитнес браслетами и прочими приложениями, где требуется оперативный обмен короткими информационными пакетами, отображающими изменение контролируемых параметров. Так, например, возможно отображение уровня заряда батареи, положение точки на маршруте в навигаторе, мониторинг физиологических данных. Соответственно, стандартный Bluetooth выполняет функции обмена файлами, и представляет собой один из вариантов Bluetooth SPP (Serial Port Protocol), поддерживающий работу с большинством существующих устройств со стандартным последовательным протоколом [5, 6].

Разработка идеологии и концепции всей работы. В рамках реализации поставленной задачи предлагается следующая структура системы контроля перемещения людей в помещениях, как показано на рис. 1.

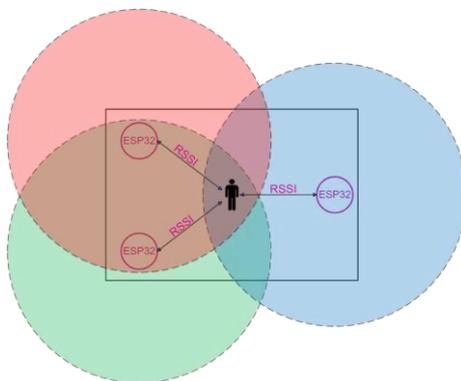


Рис. 1. Общая структура разрабатываемой системы

В помещении размещаются микроконтроллеры ESP32, которые выступают в качестве сканера сигнала Bluetooth Low Energy [7]. В качестве источника сигнала выступает смартфон. Микроконтроллер принимает сигнал Bluetooth Low Energy с параметром RSSI. Это показатель уровня принимаемого сигнала, другими словами, это значение мощности сигнала, поступающего на антенны устройства. RSSI отвечает за измерение расстояния от источника сигнала до сканера [8, 9]. ESP32 получает сигнал, затем данные обрабатываются с помощью алгоритма Fingerprint, после чего используются для расчёта координат устройства [10]. Блок-схема алгоритма Fingerprint представлена на рис. 2. Вся информация о местоположении устройства сохраняется как контрольные точки, которые могут использоваться полностью или частично в будущем для более точного определения местоположения и идентификации личности [11, 12].



Рис. 2. Блок-схема алгоритма Fingerprint

Алгоритм Fingerprint подходит для использования в системах навигации внутри помещения. Значение RSSI, содержащее силовую характеристику мощности сигнала, может быть нестабильно из-за малейших помех или препятствий, очень зависит от давления воздуха, влажности [13]. Разные фильтры и алгоритмы смягчают влияние этих факторов, но при любых помехах точность сильно падает [14, 15].

В данной работе устройство пользователя по задумке выступает источником сигнала BLE, а микроконтроллер – сканером сигнала, алгоритм Fingerprint для определения местоположения предполагает:

1. Расставить микроконтроллеры ESP32 в позиции с лучшим сигналом.
2. Перемещаться по помещению, собирая как можно больше «отпечатков» в разных местах.
3. Пользователь перемещается и смартфон сравнивает текущий отпечаток с теми, что в памяти микроконтроллера. Подобрал ближайший похожий, делается вывод, в какой области находится пользователь.

Пример «отпечатков» представлен на рис. 3.

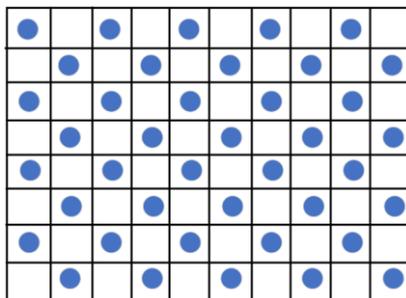


Рис. 3. «Отпечатки» в пределах контролируемой территории

Для наибольшей точности важно использовать не абсолютное значение RSSI, а относительное. Также следует собирать несколько «отпечатков» с одной позиции [16].

ESP32 только сканирует и получает сигнал, его последующий анализ и обработка полностью происходит на сервере, которому все данные передаются по беспроводной технологии Wi-Fi [17, 18]. При этом сервер может быть локальным, так и облачным, алгоритм программы позволяет сделать связь с облаком и выгрузку данных на него. В качестве сервера выступала облачная платформа интернета вещей (IoT) ThingSpeak, которая позволяет собирать, отображать и анализировать потоковые данные [19]. Передача данных на сервер и последующая визуализация представлены на рис. 4. Сервис позволяет отправлять данные в ThingSpeak с различных устройств, настраивать их отображение в реальном времени и отправлять уведомления. После этого данные с сервера считывались MATLAB – выполнялась преобработка, анализ и визуализация данных [20, 21].

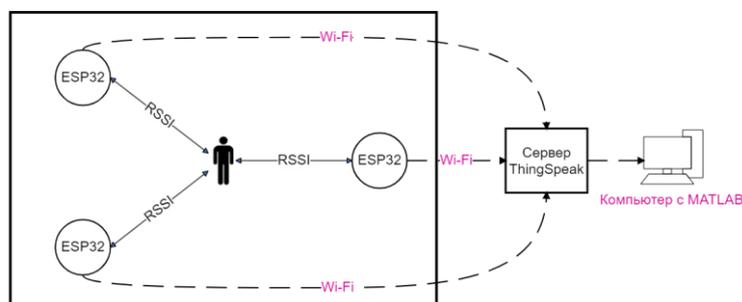


Рис. 4. Передача данных на сервер и последующая визуализация

Базовым элементом системы контроля доступа и перемещения является идентификатор. Идентификаторы устанавливают правила доступа и выступают определителем личности владельца, так как они хранят в себе неповторимые сведения о них. Идентификаторы – это одни из ключевых элементов любой системы безопасности включая системы контроля доступом и перемещения людей в помещении [22]. Чаще всего идентификаторы представляют собой:

1. Смартфон.
2. Умные часы.
3. Каски.
4. Умную одежду и многое другое.

Конечно, надёжность и устойчивость к взлому системы в значительной степени определяется видом системы и типом используемого идентификатора [23, 24].

Структурная схема системы позиционирования на основе технологии BLE, отражающая основные элементы и связи между ними, и функциональная схема представлены на рис. 5.

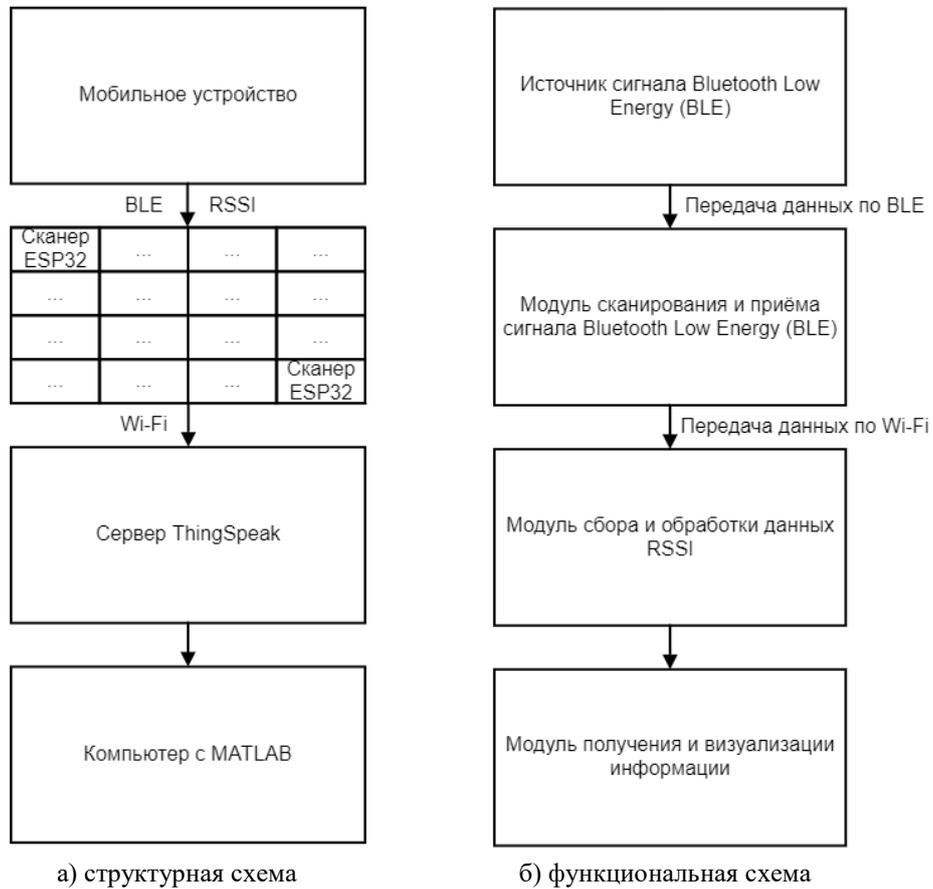


Рис. 5. Структурная и функциональная схемы системы контроля перемещения

Экспериментальные исследования. Перед тем, как приступить к экспериментальной части и проведению тестов, был написан код для микроконтроллера ESP32, который позволял сканировать эфир Bluetooth Low Energy. При этом в памяти микроконтроллера необходимые параметры для сканирования, в которые входили имя (Name) сканируемого устройства, уникальный идентификатор (Manufacturer Data) и параметр RSSI, отвечающий за расстояние между источником и приёмником сигнала Bluetooth Low Energy, были прописаны таким образом, чтобы ESP32 мог фильтровать ненужные сигналы и видеть только определённые устройства. Можно сказать, что микроконтроллер имел в своей памяти небольшую базу данных. Для излучения BLE-сигнала со смартфона использовалось приложение BLE Tool.

Когда прошла проверка по имени и по уникальному идентификатору Manufacturer Data, программа микроконтроллера получает параметр RSSI и затем передаёт данные на сервер ThingSpeak, откуда всю информацию считывает компьютер с помощью программы MATLAB.

Первый эксперимент был основан на теоретической информации, полученной при изучении технологии Bluetooth Low Energy и устройств, используемых для проведения экспериментов. Поэтому было решено использовать три микроконтроллера. Схема расстановки микроконтроллеров ESP32 для проведения первого эксперимента представлена на рис. 6.

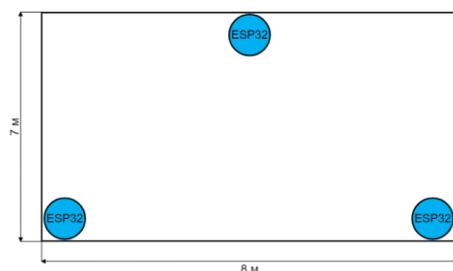


Рис. 6. Схема расстановки микроконтроллеров ESP32 для проведения первого эксперимента

Были сняты контрольные точки для алгоритма Fingerprint и проведены тесты для определения местоположения, как показано на рис. 7.



Рис. 7. Снятие «принтов» и проведение первых экспериментов

Полученные результаты имеют невероятную погрешность, поэтому была изменена конфигурация системы – добавлен один микроконтроллер ESP32 и изменено общее расположение сканеров, как показано на рис. 8.

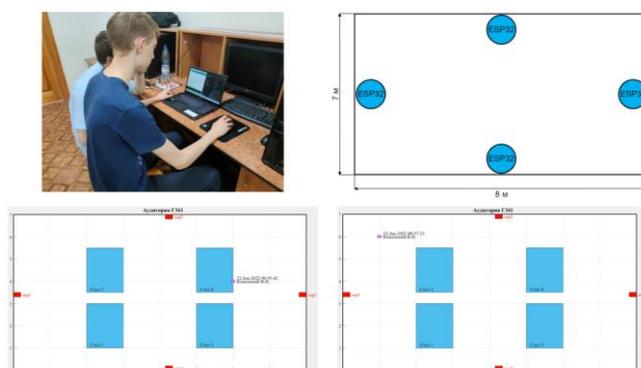


Рис. 8. Эксперимент с изменённой конфигурацией системы

Однако даже при изменённой конфигурации не удалось получить удовлетворительных результатов, и система очень сильно ошибается в определении местоположения объекта.

Чтобы понять, что вызывает помехи и мешает сигналу, создавая погрешность, было принято решение просканировать эфир и неожиданно была обнаружена ещё одна возможность микроконтроллера ESP32, а именно возможность сбора Big Data по существующим беспроводным сигналам, в частности, Wi-Fi и Bluetooth. На рис. 9 представлен эфир беспроводных сетей в аудитории, где проводился эксперимент, во время рабочего дня.



а) эфир Wi-Fi сети



б) эфир Bluetooth сети

Рис. 9. Эфир беспроводных сетей

Можно заметить, что собранная информация содержит имя устройства, если оно есть, MAC-адрес, уникальный идентификатор Manufacturer Data, показатель мощности сигнала txPower и параметр RSSI. Что делать с этими данными – вопрос остаётся открытым, но важно отметить, что такая возможность у микроконтроллера есть.

Исходя из полученных данных возникла необходимость создать «идеальные условия» и максимально уменьшить влияние посторонних сигналов, поэтому было принято решение отправиться в поле для проведения экспериментов. Первым делом была установлена максимальная дальность сигнала в прямой видимости.

Оптимальное расстояние для позиционирования составило 3 метра. Исходя из полученных данных, был построен полигон для экспериментов, имитирующий помещение 6 на 6 метров, как показано на рис. 10.

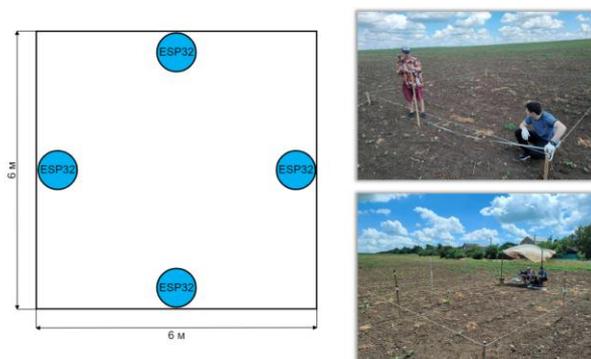


Рис. 10. Построение полигона для экспериментов при «идеальных условиях»

Система без ошибки определила местоположение объекта, точность составляла от 0.5 до 1.5 метров.

Для экспериментов было решено сразу изменить конфигурацию системы для увеличения точности определения местоположения объекта. Был построен полигон для экспериментов, имитирующий помещение 4 на 4 метра.

При такой конфигурации система без ошибок определяла точное местоположение объекта как в центре каждого сегмента, так и в центре всей контролируемой области, а также без ошибок определяла позиции по углам полигона. Точность составляла от 0.5 до 1 метра, эксперименты с определением местоположения представлены на рис. 11,а,б.

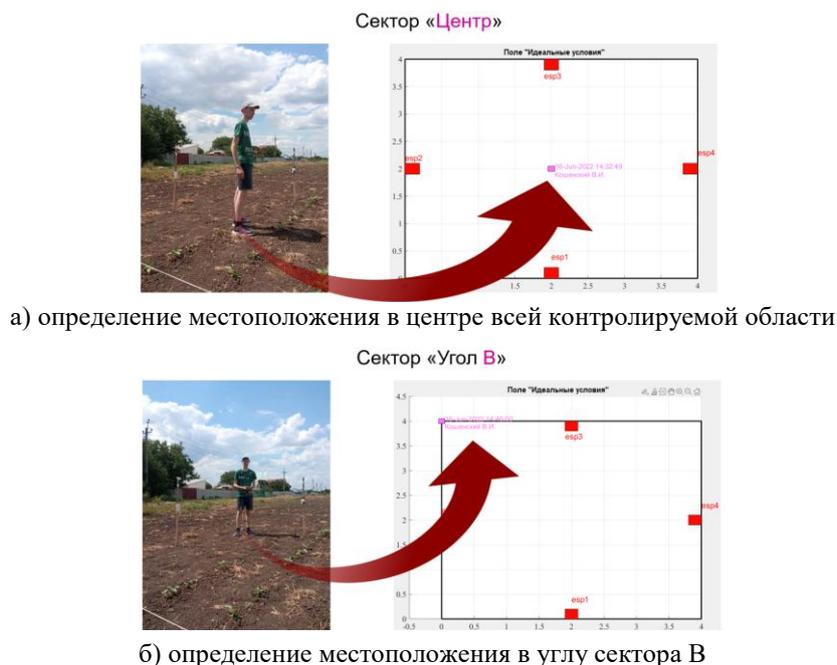


Рис. 11. Результаты экспериментов на полигоне 4 на 4 метра

Полученные результаты позволили рассчитать оптимальное количество микроконтроллеров ESP32 и их расположение в помещении. Были произведены замеры помещения для правильного расположения сканеров. После этого была возведена система в соответствии с полученными во время эксперимента данными, как показано на рис. 12.

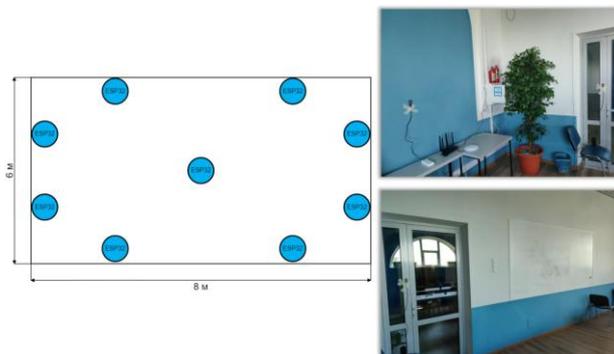


Рис. 12. Система для тестов с оптимальным количеством сканеров

При такой конфигурации система в помещении стала работать во много раз лучше, чем при первых испытаниях внутри помещения, и без ошибок стала определять точное местоположение объекта как в центре каждого сегмента, так и в центре всей контролируемой области, а также без ошибок определяла позиции по углам полигона, показывая превосходные результаты. Точность составляла от 0.5 до 1 метра.

Система также была протестирована на определение нескольких объектов. Были получены отличные результаты по определению местоположения сразу трёх объектов, как показано на рис. 13.

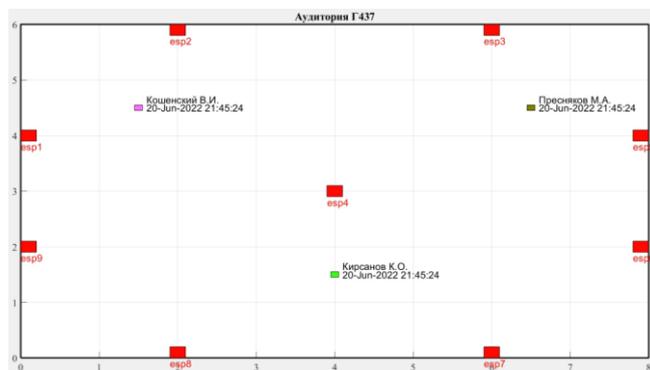


Рис. 13. Определение местоположение нескольких объектов

В рамках данной работы была решена задача идентификации и контроля приближения людей к охраняемому объекту. Было установлено, что максимальная дальность сигнала в помещении составила около 30 метров. Однако оптимальное расстояние для точного позиционирования составило 2 метра. Полученные результаты немного ухудшились по сравнению с экспериментами в поле, это связано с повышенными помехами в помещении.

Были проведены эксперименты на разных расстояниях от условно охраняемого объекта, система без ошибок выводила соответствующие уведомления о приближении, как показано на рис. 14,а,б.

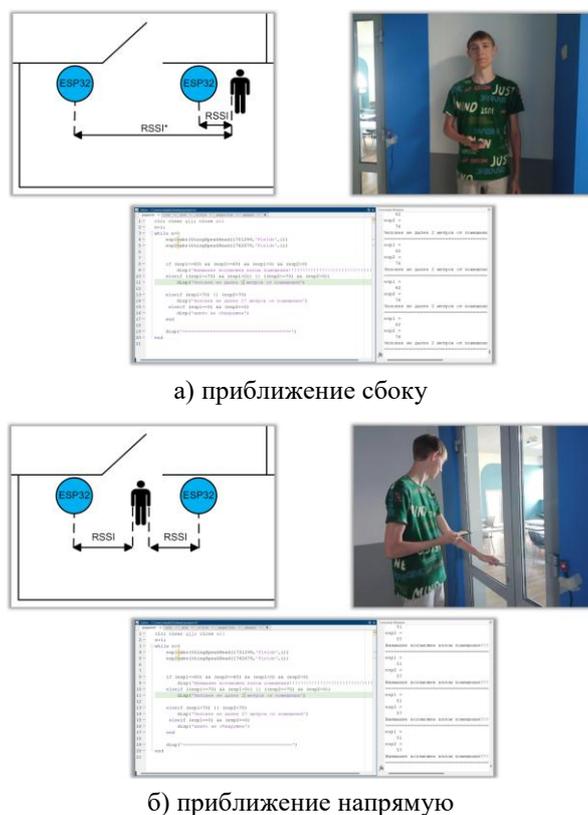


Рис. 14. Эксперименты приближения к охраняемой территории

Важно отметить, что в такой системе необходимо использовать два микроконтроллера ESP32, так как при приближении только к одному микроконтроллеру система может выдать ошибочные результаты о положении объекта, который хочет попасть к подконтрольному объекту. В то время как использование двух микроконтроллеров исключит такие ошибки, так как второй микроконтроллер будет иметь другое значение параметра RSSI и скорректирует информацию о реальном положении объекта. Это также необходимо для идентификации объекта в ситуации, когда он стоит между двумя микроконтроллерами, которые в таком случае получают одинаковые значения RSSI и без ошибки определяют, что непосредственно перед охраняемым объектом кто-то есть.

Также при решении задачи идентификации и контроля приближения людей к охраняемому объекту была решена ещё одна задача, которая заключается в организации системы сбора и хранения статистики посещения подконтрольного объекта, как показано на рис. 15.

Можно заметить, что собранная информация содержит в себе имя человека, который приближался к охраняемому объекту, дату и время приближения, а также расстояние, на котором был человек от охраняемого объекта в момент его обнаружения системой [23, 24].

```

Сonfirm Window
T1 =
'18-Jun-2022 12:31:01'
d =
""
никто не обнаружен
=====
esp1 =
86
esp2 =
83
d =
"Ковенский В.И."
Человек "Ковенский В.И." обнаружен в 18-Jun-2022 12:31:01 не далее 27 метров от помещения
=====
esp1 =
65
esp2 =
58
d =
"Ковенский В.И."
Человек "Ковенский В.И." обнаружен в 18-Jun-2022 12:31:01 не далее 2 метров от помещения
=====
esp1 =
42
esp2 =
58
d =
"Ковенский В.И."
ВНИМАНИЕ! Человек "Ковенский В.И." в 18-Jun-2022 12:31:01 находится прямо у двери
=====
Я >> |
    
```

Рис. 15. Сбор и хранение статистики посещения подконтрольного объекта

Вывод. В данной работе была реализована система для контроля перемещения людей в помещениях с использованием технологии Bluetooth Low Energy на базе микроконтроллера ESP32.

По результатам моделирования и проведённых экспериментов ввиду применения алгоритма Fingerprint удаётся достичь невероятной точности от 0.5 до 1 метра в зависимости от поставленной задачи, а также от количества и качества принтов.

Данная система является достаточно простой, так как для её реализации не требуется большого количества составляющих, а также легко устанавливается и быстро развёртывается. Ещё одним преимуществом является гибкость системы – она легко масштабируется и нет ничего сложного, чтобы подстроить её под помещения практически любой сложности и конфигурации. Также система более надёжна по сравнению с аналогами ввиду отсутствия открытого эфира вещания. Из-за применяемых технологий обработки сигнала система обладает одним из самых высоких значений точности определения позиционирования. К положительным аспектам системы можно также отнести многоцелевой алгоритм, который позволяет конфигурировать и тонко настраивать всю систему под определённые задачи. Несомненным преимуществом системы является её низкая стоимость по сравнению с аналогами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаповалов Д.С., Заргарян Ю.А. Особенности типов позиционного трекинга при реализации VR и AR систем // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): Сб. трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. В 3-х т. – Ростов-на-Дону – Таганрог, 2020. – С. 48-52.
2. Губкин В.С., Заргарян Ю.А. Технологии беспроводной передачи данных в современном мире // 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. 188-191.
3. Ковенский В.И., Заргарян Ю.А. Особенности функционирования BLE в микроконтроллере ESP32 // Сб. трудов международной молодежной школы С 23 «Инженерия – XXI» (г. Новороссийск, 21-22 апреля 2022 г.) / под общ. ред. к.ф.н. доцента И.В. Чистякова. – Новороссийск: Изд-во НФ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 65.
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. Диков А.И., Мойся Р.А., Толченников С.А., Коптева А.В., Витченко В.А., Шестова Е.А. Анализ систем контроля перемещения транспорта // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и акустика (ПАРУСА-2021): Сб. трудов X Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума в рамках мероприятий, посвященных году Науки и технологий в РФ, г. Геленджик. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 163-168.
6. Заргарян Ю.А., Курсанов К.О., Соловьева В.О. Разработка лабораторного стенда для исследования технологии беспроводной передачи ZigBee // Сб. трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием (9–11 декабря 2021 г.). – С. 275-278.
7. 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.
8. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, No. 23. – P. 6762-6772.
9. Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьев В.В. Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // Информатизация и связь. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
10. 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.
11. Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Milesenko 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.
12. Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А., Номерчук А.Я. Оценка состояния динамического взвешивания с использованием фильтра Калмана // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2 (2022). – С. 236-249.
13. Технология ZigBee. – URL: <https://habr.com/ru/post/155037/>.
14. JOB50.RU. – URL: <https://job50.ru/>.
15. PERSON-AGENCY. – URL: <https://person-agency.ru/salary-programmist.html>.
16. Шестова Е.А., Шадрин В.В. Исследование построения видов операций над нечеткими множествами и нечеткой аппроксимирующей системы в среде MATLAB: учеб. пособие. – Таганрог, 2019.
17. Соловьев В.В., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А., Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю. Проектирование и моделирование объемного гидропривода. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – 97 с.
18. АРДУИНО РОСТОВ. – URL: <https://xn---7sbhgu4ahbanfng.xn--p1ai/>.
19. IBEACONRUSSIA. – URL: <https://www.ibeaconrussia.ru/gateway-beacon.html>.
20. Идентификаторы. – URL PERCo: <https://www.perco.ru/products/identifikatory/>.
21. Thingspeak. – URL: <https://thingspeak.com/>.
22. Об использовании облачного сервиса. – URL: <https://www.radiokot.ru/articles/81/>.
23. Отпечаток браузера. – URL: <https://habr.com/ru/company/selectel/blog/521550/>.
24. Технологии позиционирования. – URL: <https://merusoft.ru/tehnologii-pozicionirovaniya-vnutri-pomeshhenij-rtls/>.

REFERENCES

1. Shapovalov D.S., Zargaryan Yu.A. Osobennosti tipov pozitsionnogo trekinga pri realizatsii VR i AR sistem [Features of positional tracking types in the implementation of VR and RD systems], *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSAU-2020): Sb. trudov KHVIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Information technologies, System analysis and Management (ITSAU-2020). Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, postgraduates and students]. In 3 vol. Rostov-on-Don – Taganrog, 2020, pp. 48-52.
2. Gubkin V.S. Zargaryan Yu.A. Tekhnologii besprovodnoy peredachi dannykh v sovremennom mire [Wireless data transmission technologies in the modern world], *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika: Sb. trudov X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma v ramkakh meropriyatij, posvyashchennykh godu Nauki i*

- tekhnologiy v Rossiyskoy Federatsii* [Automation problems. 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-Donu, 2021, pp. 188-191.
3. *Koshenskiy V.I., Zargaryan Yu.A.* Osobennosti funktsionirovaniya BLE v mikrokontrollere ESP32 [Features of functioning in the ESP32 microcontroller], *Sb. trudov mezhdunarodnoy molodezhnoy shkoly C 23 «Inzheneriya – XXI» (g. Novorossiysk, 21-22 aprelya 2022 g.)* [Proceedings of the international youth school S 23 "Engineering – XXI century" (Novorossiysk, April 21-22, 2022)], under the general editorship I.V. Chistyakova. Novorossiysk: Izd-vo NF BGTU im. V.G. Shukhova, 2022, pp. 65.
 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. *Dikov A.I., Moysya R.A., Tolchennikov S.A., Kopteva A.V., Vitchenko V.A., Shestova E.A.* Analiz sistem kontrolya peremeshcheniya transporta [Analysis of transport movement control systems], *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika (PARUSA-2021): Sb. trudov X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma v ramkakh meropriyatiy, posvyashchennykh godu Nauki i tekhnologiy v RF, g. Gelendzhik* [Automation problems. Regional management. Communication acoustics and (SAILS-2021): proceedings of the x All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum in the framework of events dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation, Gelendzhik]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 163-168.
 6. *Zargaryan Yu.A., Kirsanov K.O., Solov'eva V.O.* Razrabotka laboratornogo stenda dlya issledovaniya tekhnologii besprovodnoy peredachi ZigBee [Development of a laboratory stand for the study of the technology of wireless transmission of ZigBee networks], *Sb. trudov XVIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiem (9–11 dekabrya 2021 g.)* [Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students with International Participation (December 9-11, 2021)], pp. 275-278.
 7. *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.
 8. *Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E.* The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, Vol. 12, No. 23, pp. 6762-6772.
 9. *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 mobile objects under uncertainty for the choice of control solutions], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2016, No. 3, pp. 56-62.
 10. *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.
 11. *Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Mileshko 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.
 12. *Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A., Nomerchuk A.Ya.* Otsenka sostoyaniya dinamicheskogo vzhivaniya s ispol'zovaniem fil'tra Kalmana [Estimation of the state of dynamic weighing using the Kalman filter], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 2 (2022), pp. 236-249.
 13. Tekhnologiya ZigBee [ZigBee technology]. Available at: <https://habr.com/ru/post/155037/>.
 14. JOB50.RU. Available at: <https://job50.ru/>.
 15. PERSON-AGENCY. Available at: <https://person-agency.ru/salary-programmist.html>.
 16. *Shestova E.A., Shadrina V.V.* Issledovanie postroeniya vidov operatsiy nad nechetkimi mnozhestvami i nechetkoy approksimiruyushchey sistemy v srede MATLAB: ucheb. posobie [Investigation of the construction of types of operations on fuzzy sets and a fuzzy approximating system in MATLAB: textbook]. Taganrog, 2019.

17. Solov'ev V.V., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A., Beloglazov D.A., Kosenko E.Yu. Proektirovanie i modelirovanie ob"emnogo gidroprivoda [Design and modeling of a volumetric hydraulic drive]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, 97 p.
18. ARDUINO ROSTOV [ARDUINO ROSTOV]. Available at: <https://xn----7sbhgu4ahbanfnng.xn--p1ai/>.
19. IBEACONRUSSIA. Available at: <https://www.ibeaconrussia.ru/gateway-beacon.html>.
20. Identifikatory [Identifiers]. URL PERCo: <https://www.perco.ru/products/identifikatory/>.
21. Thingspeak. Available at: <https://thingspeak.com/>.
22. Ob ispol'zovanii oblachnogo servisa [About using the cloud service]. Available at: <https://www.radiokot.ru/articles/81/>.
23. Otpechatok brauzera [Browser fingerprint]. Available at: <https://habr.com/ru/company/selectel/blog/521550/>.
24. Tekhnologii pozitsionirovaniya [Positioning technologies]. Available at: <https://merusoft.ru/tehnologii-pozicionirovaniya-vnutri-pomeshhenij-rtls/>.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Н.А. Иванова.

Заргарян Юрий Артурович – Южный федеральный университет, e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Кошенский Вадим Игоревич – e-mail: koshenskii@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; бакалавр.

Кирсанов Кирилл Олегович – e-mail: kkirsanov@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; бакалавр.

Пресняков Максим Сергеевич – e-mail: mpresniakov@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; бакалавр.

Zargaryan Yuri Arturovich – Southern Federal University, e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Koshensky Vadim Igorevich – e-mail: koshenskii@sfedu.ru; the department of automatic control systems; bachelor.

Kirsanov Kirill Olegovich – e-mail: kkirsanov@sfedu.ru; the department of automatic control systems; bachelor.

Presnyakov Maxim Sergeevich – e-mail: mpresniakov@sfedu.ru; the department of automatic control systems; bachelor.

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-119-129

М.С. Анферова, А.М. Белевцев

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ МОНИТОРИНГА

Рассмотрены проблемы стратегического анализа и выбора направлений развития инновационных предприятий в условиях перехода к 6 технологическому укладу и индустрии 4.0. Определены основные уровни анализа. Обозначены цели стратегического анализа исходя из масштаба проводимого исследования. Выделены задачи анализа, решение которых позволит достичь поставленных целей. Показана сложность решения задач глобального мониторинга, которые обусловлены большим объемом разнородной и неструктурированной информации. В этих условиях тематический поиск и аналитическая обработка информации не могут быть выполнены без применения автоматизированных информационно-аналитических систем и создания поисковых сервисов на базе искусственного интеллекта. Предложена общая процедура мониторинга. Определены основные этапы мониторинга технологических трендов, показаны задачи, решаемые в рамках конкретного этапа и планируемый результат. На основе общей процедуры мониторинга определены основные приоритетные функции, которыми должны обладать разрабатываемые сервисы. А также проблемы их разработки и структуризация полученной информации в виде информационных объектов и кластеризация документов. В отличие от известных систем глобального мониторинга, в которых поиск основан на индикаторах: рост использования ключевых слов, увеличение численности новых авторов, цитирование работ из смежных областей. Предложены алгоритмы, обеспечивающие определение опорных тем, оценку ранжирования и релевантности информации. Дано описание работы алгоритмов на примере создания сводной информационной таблицы, с помощью которой происходит формирование взаимосвязей документов научно-технологического развития по заданному направлению мониторинга и поиск конкретных документов в базе данных. Построение поисковых сервисов на основе представленных алгоритмов обеспечит выделение опорных тем документов, предоставит более достоверные результаты кластеризации неструктурированной информации и формирования научно-технологических трендов, в информационно-аналитических комплексах. Для реализации алгоритма предлагается использовать язык программирования Python. Внедрение данных алгоритмов повысит качество и эффективность информационного поиска в условиях большого объема неструктурированной информации.

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

M.S. Anferova, A.M. Belevtsev

ANALYSIS OF REQUIREMENTS AND DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR INTELLIGENT MONITORING SERVICES

The paper considers the problems of strategic analysis and the choice of directions for the development of innovative enterprises in the conditions of transition to the 6th technological order and industry 4.0. The main levels of analysis are determined. The objectives of the strategic analysis are outlined based on the scale of the research being conducted. The analysis tasks are highlighted, the solution of which will allow achieving the set goals. The complexity of solving global monitoring tasks, which are caused by a large volume of heterogeneous and unstructured information, is shown. In these conditions, thematic search and analytical processing of information cannot be performed without the use of auto-

mated information and analytical systems and the creation of search services based on artificial intelligence. A general monitoring procedure is proposed. The main stages of monitoring technological trends are defined, the tasks to be solved within a specific stage and the planned result are shown. Based on the general monitoring procedure, the main priority functions that the developed services should have are determined. As well as the problems of their development and structuring of the received information in the form of information objects and clustering of documents. In contrast to the well-known global monitoring systems, in which the search is based on indicators: an increase in the use of keywords, an increase in the number of new authors, quoting works from related fields. Algorithms are proposed that provide the definition of reference topics, assessment of ranking and relevance of information. The description of the algorithms is given on the example of creating a summary information table, with the help of which the interrelationships of documents of scientific and technological development in each direction of monitoring and the search for specific documents in the database are formed. The construction of search services based on the presented algorithms will ensure the allocation of reference topics of documents, provide more reliable results of clustering of unstructured information and the formation of scientific and technological trends in information and analytical complexes. To implement the algorithm, it is proposed to use the Python programming language. The implementation of these algorithms will improve the quality and efficiency of information retrieval in conditions of a large volume of unstructured information.

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

Введение. Структурные, экономические и политические изменения в мировой экономике приводят к резкому обострению борьбы за технологического превосходство. В этой связи задача стратегического анализа и определения направлений и трендов научно-технологического развития становится чрезвычайно актуальной [1, 2].

Ее решение невозможно без создания проблемно-ориентированных, информационно-аналитических комплексов [3] и разработки эффективных процедур мониторинга включая поиск, извлечение и анализ информации на основе технологий искусственного интеллекта, способных работать в условиях:

- ◆ чрезвычайно быстрой динамик формирования новых направлений и (трендов) и траекторий их развития;
- ◆ взрывного характера нарастания объемов разнородной и не структурированной информации (Big Data [4]);
- ◆ резкого сокращение длительности инновационного цикла [5].

Основная часть. Цели и задачи стратегического анализа определяются уровнем и масштабом проводимого исследования [6]:

- ◆ Международный.
- ◆ Государственный.
- ◆ Корпоративный.

На международном уровне основными задачами являются [7]:

- ◆ создание механизмов наднационального регулирования научно-технологической сферы;
- ◆ выработка совместных программ в рамках объединений стран;
- ◆ эффективная интеграция и стандартизация деятельности в сфере науки, технологий и инноваций [8].

На Государственном уровне:

- ◆ формирование общего представления о состоянии мировой науки и технологий;

- ◆ выявление конкурентных преимуществ страны в ключевых областях и др.

На корпоративном уровне:

- ◆ определение технологических и продуктовых трендов заданных предметных областях;
- ◆ выявление потенциальных зон научно-технологического прорыва;
- ◆ анализ конкурентного окружения и др.

Для достижения поставленных целей необходимо обеспечить решение следующих задач анализа:

1. Выявление направлений фундаментальных и поисковых исследований, методов и способов, как основы для создания технологий нового поколения.
2. Выявление зарождающихся замещающих технологий приводящих к формированию новых рынков (разрушающих инноваций). В том числе, определение критических точек т.е. прогноз момента времени, когда это замещение произойдет.
3. Выявление зарождающихся новых функциональных технологий и технологических направлений, способных кардинально изменить функциональные возможности и технические характеристики технических решений, создаваемых на их основе. (полностью менять структуру рынков - разрушающие инновации).
4. Выявление зарождающихся направлений создания технических решений на базе новых функциональных технологий (инновационных продуктов), способных полностью менять структуру рынков - разрушающие инновации).
5. Выявление инновационных продуктовых, процессных, организационных и маркетинговых технологий.
6. Выявление технологических направлений для широкого междисциплинарных спектра областей применения.
7. Выявление требуемых компетенций для участия в программах перспективных направлений
8. Анализ внешних ограничений и воздействий на предметную область и проекты рассматриваемого предприятия.
9. Оценка возможности участия в выбранных проектах на базе существующих компетенций и технологического базиса рассматриваемого предприятия, в том числе и в условиях внешних ограничений.

Информационной логистической основой для решения вышеперечисленных задач является создание динамически формируемых и обновляемых на основе эффективных процедур мониторинга специализированных баз данных [9].

Общую процедуру мониторинга можно представить в виде следующих взаимосвязанных этапов (табл. 1):

Таблица 1

Этапы мониторинга технологических трендов

№	Этап	Процесс	Результат
1	Постановка задачи.	Выбор предметной области. Определяется цель исследования	Выбор релевантных источников данных
2	Сбор информации	Формирование запроса и осуществление сбора сведений	Формирование базы данных.
3	Обработка полученной информации	Очистка, фильтрация и автоматизированный анализ собранной информации	Формирование наиболее перспективных для рассматриваемой компании направлений (трендов)
4	Представление, интерпретация и обобщения результатов	Разработка предложений для принятия управленческих решений	Визуализация полученных результатов

Практическая реализация предлагаемой процедуры невозможна без применения автоматизированных информационно-аналитических систем и специальных поисковых сервисов с применениями методов искусственного интеллекта [10].

Анализ требований к интеллектуальным сервисам мониторинга. Можно выделить следующие приоритетные функции, которые должны обеспечивать разрабатываемые сервисы [11]:

Ф1. Ввод новых информационных объектов.

Цель: Обеспечение в ходе мониторинга ввода в базу данных информационных объектов различного типа и их индексация:

Ф2. Структуризация полученной информации в виде информационных объектов (тем). Определение зарождающихся, замещающих и критических технологий Автоматизированное формирование стратегических групп заданного предприятия. Формирование ключевых слов заданной тематической области

Цель: предварительное фиксирование всех значимых научно-технических направлений, выявляемых в ходе мониторинга и осуществление параллельной привязки к ним соответствующих информационных объектов (документов, предприятий, продукции), а также дальнейшее итоговое формирование направлений развития тематической области.

Ф3. Функция ранжирования соответствующих поисковому запросу документов.

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

Ф4. Полнотекстовый поиск документов в пределах базы информационных ресурсов информационно-аналитического комплекса.

Цель: Формирование взаимосвязей документов стратегического развития по заданному направлению

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

Цель: Динамическое расширение навигации мониторинга

При этом наибольшую сложность представляет собой проблема определение зарождающихся, замещающих и критических технологий и кластеризации документов (Ф2, Ф3) [12].

Проведенный анализ исследовательских программ показал, что для реализации данных функций в специализированной базе данных эффективно применять методы искусственного интеллекта (ИИ). Для решения поставленных задач были разработаны следующие алгоритмы:

- ◆ Алгоритм определения опорных тем.
- ◆ Алгоритм оценки ранжирования и релевантности информации.

Алгоритм определения опорных тем

Процедура формирования трендов может быть основана на определении опорных тем в документах, хранящихся в базе данных.

Предлагаемый алгоритм основан на определении тем по ключевым словам. Алгоритм включает в себя следующие основные этапы (рис. 1):

- ◆ Разделение данных по языкам.
- ◆ Очистка данных с помощью токенизации, лемматизации и стемминга.
- ◆ Векторизация.
- ◆ Извлечение ключевых слов.

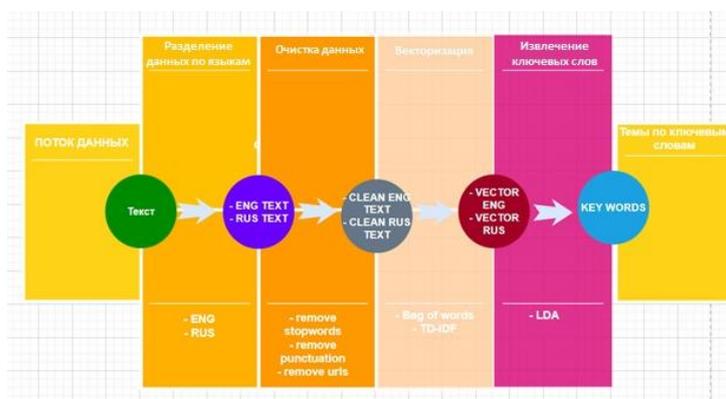


Рис. 1. Алгоритм определения опорных тем

Рассмотрим основные этапы предлагаемого алгоритма:

- ◆ Векторизация.
- ◆ Извлечение ключевых слов.

Векторизация – процесс преобразования слов в числа [13].

В машинном обучении векторизация – это этап извлечения признаков. Необходимо извлечь из текста некоторые отличительные признаки для обучения модели путем преобразования текста в числовые векторы [14].

Вес термина («важность» слова для идентификации данного текста) в документе можно определить методом TF-IDF.

TF (term frequency – частота слова) – отношение числа вхождений некоторого слова к общему числу слов документа [15]. Таким образом, оценивается важность слова в пределах отдельного документа.

$$TF(t, d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}, \quad (1)$$

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

В качестве меры взвешивания слова можно воспользоваться F-мерой, а именно precision (точность) и recall (полнота) – это метрики, которые используются при оценке большей части алгоритмов извлечения информации. Суть точности и полноты таких мер очень проста [16].

Для решения поставленных задач удобнее будет использовать именно инвертированный индекс, дополненный мерой TF-IDF, так как он полностью удовлетворяет потребность быстрого полнотекстового поиска по коллекции документов, а за счёт дополнительного поля, содержащего частоту термов, мы сможем использовать его для организации ранжирования, а также в качестве кэша векторов документов, хранящихся в специализированной базе данных.

Извлечение ключевых слов. Модели анализа тем способны обнаруживать темы в тексте с помощью передовых алгоритмов машинного обучения, которые подсчитывают слова и находят и группируют похожие шаблоны слов [17]. Проведенный анализ показал эффективность использования метода LDA.

LDA (Latent Dirichlet Allocation – Латентное размещение Дирихле)

Алгоритм работы данного метода:

1. Определяется фиксированный набор тем, состоящих из представленных (неизвестных) наборов слов. Данные темы уже находятся в документах базы данных, но мы еще их не знаем.

2. LDA пытается сопоставить все (известные) документы с (неизвестными) темами таким образом, чтобы слова в каждом документе были в основном захвачены этими темами [18, 19].

Документы с похожими темами будут использовать одинаковые слова. Также предполагается, что каждый документ состоит из смеси тем, и каждое слово имеет вероятность принадлежности к определенной теме.

LDA предполагает, что документы генерируются следующим образом: выбирается смесь тем (например, 20% темы А, 80% темы В и 0% темы С), а затем выбираются слова, которые принадлежат этим темам. Слова выбираются случайным образом в соответствии с вероятностью их появления в определенном документе (рис. 2).

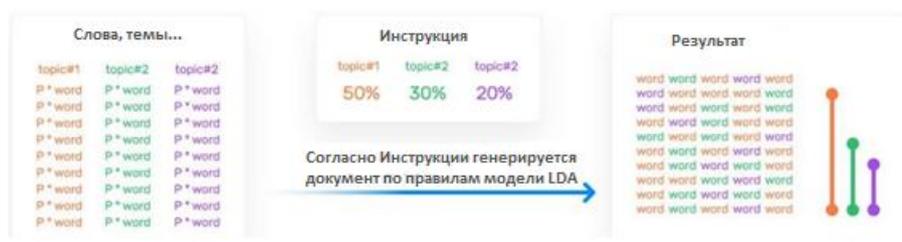


Рис. 2. Алгоритм генерирования документов для LDA

3. LDA видит документ и предполагает, что он был создан, как описано выше. Затем он работает в обратном направлении - от слов, составляющих документ, и пытается угадать смесь тем, которая привела к этому конкретному расположению слов (рис. 3).

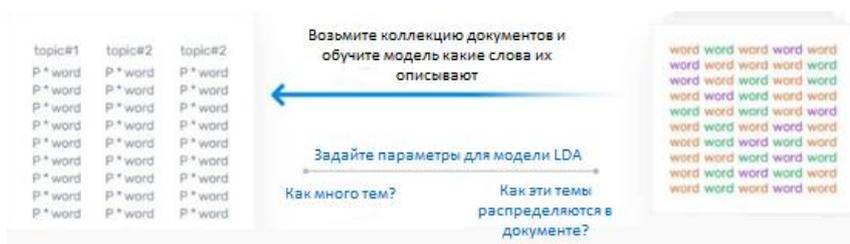


Рис. 3. Алгоритм распознавания тем LDA

В результате выполнения данного алгоритма будут выделены опорные темы документов, хранящихся в базе данных, а также процентное соотношение каждой темы в конкретном документе, что обеспечит более достоверные результаты формирования трендов, путем недопущения субъективных оценок аналитиков.

Алгоритм оценки ранжирования и релевантности информации

Релевантность в информационном поиске – это семантическое соответствие поискового запроса полученному документу [20].

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

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

С помощью алгоритма LDA мы получили не только список потенциальных тем, но и процентное соотношение (вес) каждого ключевого слова в конкретном документе. Причем, чем выше вес, тем больше вероятность того, что это подходящая тема для текста (рис. 4).

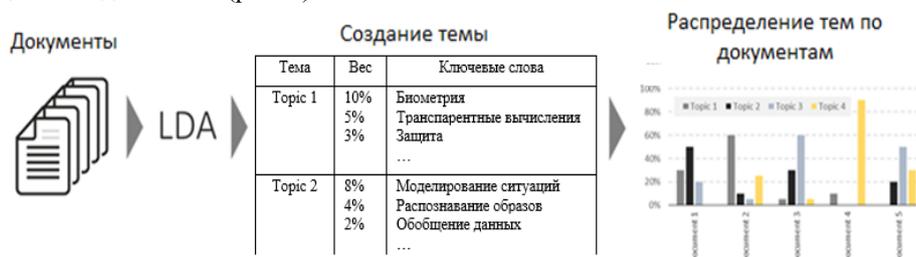


Рис. 4. Результат работы алгоритма LDA

Предположим, что мы всегда будем брать слово с наибольшим весом в качестве темы данного текста. Остальные темы необходимо сохранить в отдельный файл (мы будем рассматривать их как ключевые слова). Тогда алгоритм ранжирования и релевантности информации будет выглядеть следующим образом (рис. 5):



Рис. 5. Алгоритм оценки ранжирования и релевантности информации

На основании результатов алгоритма определения опорных тем можно создать сводную информационную таблицу для оценки ранжирования и релевантности информации (табл. 2) с колонками "файл", "тема", "ключевые слова", где в колонке:

- ◆ "файл" – хранится ссылка на файл, определенная TF-IDF;
- ◆ "тема" – тема, определенная LDA;
- ◆ "ключевые слова" – сохранение остальных ключевых слов.

Имея такую таблицу, будет легко модифицировать ее в будущем (если мы будем изучать модель с нуля), но также относительно легко подключить ее к существующей базе данных.

Используя таблицу, описанную в предыдущем разделе, облегчается поиск конкретных документов (Ф4). Достаточно выбрать определенные ключевые слова из таблицы, и мы сразу получаем доступ к заданным файлам (столбец файл).

Таблица 2

Сводная информационная таблица

№	Файл	Тема	Ключевые слова
1.	Document 1	Технологии ИИ	Моделирование ситуаций Распознавание образов Обобщение данных ...
2.	Document 2	Кибербезопасность	Биометрия Транспарентные вычисления Защита ...
3.	Document 3	Кибероружие	Кибератака Кибервойна Самоуничтожение ...
4.

Выводы. Задача проведения непрерывного глобального мониторинга научно-технологических направлений, технологических изменений и тенденций развития актуальна и требует создания новых методов обработки и анализа информации [21].

Для решения поставленной задачи сформированы алгоритмы интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации в специализированной базе данных.

Внедрение данных алгоритмов в специализированную базы данных информационно-аналитического комплекса АРМ Аналитика [4] позволило сократить общее время поиска информации в 5-6 раз по отношению к запросам, формируемым в поисковых системах общего назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белевцев А.М., Бальбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А. Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3 (164). – С. 35-45.
2. Микова Н.С., Соколова А.В. Мониторинг глобальных технологических трендов: теоретические основы и лучшие практики // Форсайт. – 2014. – Т. 8, № 4.
3. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения // Матер. III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2018.
4. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Бальбердин В.А. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Научно-технологические тренды. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.
5. Анферова М.С., Белевцев А.М. Разработка алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 6-17.
6. Шваб К. Четвертая промышленная революция. – М.: Эксмо, 2018. – 285 с. – ISBN 978-5-699-98379-7.
7. Загородников А.Н. Управление общественными связями в бизнесе: учебник. – М.: Крокс, 2013. (гл.3 «SWOT-анализ: сущность, цель, содержание»).
8. Tanya Sammut-Bonnici, David Galea. PEST analysis // Wiley Encyclopedia of Management. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015-01-22.
9. Philip Kotler, Roland Berger, Nils Bickhoff. The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business.

10. *Анферова Маргарита Сергеевна, Белевцев Андрей Михайлович.* Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объема неструктурированной информации // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко "Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении" «КомТех-2020».
11. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Поисковые роботы для автоматизированного мониторинга информации в сетях общего и специального назначения // 18-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» 2019 г.
12. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Общая концепция создания технологии интеллектуального поиска информации в сетях общего и специального назначения // XXV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко "Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении" «КомТех-2021».
13. *Salton G. and Buckley C.* Term-weighting approaches in automatic text retrieval // *Information Processing & Management.* – 1988. – Vol. 24 (5). – P. 513-523.
14. *Jacob Devlin and Ming-Wei Chang.* Research Scientists, Google AI Language: Open Sourcing BERT: State-of-the-Art Pre-training for Natural Language Processing (англ.). – Google, Inc, 2018.
15. *Charles L.A. Clarke, Gordon V. Cormack.* Dynamic Inverted Indexes for a Distributed Full-Text Retrieval System (англ.) // *MultiText Project Technical Report MT-95-01.* – University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada, 1995.
16. *Павлов Ю.Н., Майструк К.А.* Сравнение методов оценки тональности текста // *Молодой ученый.* – 2016. – № 12 (116). – С. 59-64.
17. *Liu X. and Croft W.B.* Cluster-based retrieval using language models // *In Proceedings of SIGIR '04.* – 2004. – P. 186-193.
18. *Blei D.M., Ng A.Y., and Jordan M.J.* Latent Dirichlet allocation // *In Journal of Machine Learning Research.* – 2003. – No. 3. – P. 993-1022.
19. *Teh Y.W., Jordan M.I., Beal M.J., and Blei D.M.* Hierarchical Dirichlet processes // *Technical Report, Department of Statistics, UC Berkeley,* 2004.
20. *Словарь по кибернетике / под ред. академика В.С. Михалевича.* – 2-е изд. – Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии имени М.П. Бажана, 1989. – 751 с. – (С48).
21. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Разработка алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2021. – № 3. – С. 6-17.

REFERENCES

1. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A.* Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommunikatsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of the directions of development of nano- and IT-technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3 (164), pp. 35-45.
2. *Mikova N.S., Sokolova A.V.* Monitoring global'nykh tekhnologicheskikh trendov: teoreticheskie osnovy i luchshie praktiki [Monitoring global technological trends: theoretical foundations and best practices], *Forsayt* [Foresight], 2014, Vol. 8, No. 4.
3. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Analiz napravleniy sozdaniya algoritmov effektivnogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Analysis of the directions of creating algorithms for effective information retrieval in general and special purpose networks], *Mater. III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference "Actual problems of modern science and production"]. Ryazan': RGRTU, 2018.
4. *Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Belevtsev A.A., Balyberdin V.A.* Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [High-tech technologies], 2019, Vo.. 20, No. 3, pp. 24-29.
5. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Razrabotka algoritmov intellektual'nogo servisa poiska i monitoringa informatsii [Development of algorithms for intelligent information search and monitoring service], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3, pp. 6-17.

6. *Shvab K.* Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The Fourth Industrial Revolution]. Moscow: Eksmo, 2018, 285 p. ISBN 978-5-699-98379-7.
7. *Zagorodnikov A.N.* Upravlenie obshchestvennymi svyaziyami v biznese: uchebnik [Management of public relations in business: textbook]. Moscow: Kro-kus, 2013.
8. *Tanya Sammut-Bonnici, David Galea.* PEST analysis // Wiley Encyclopedia of Management. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015-01-22.
9. *Philip Kotler, Roland Berger, Nils Bickhoff.* The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business.
10. *Anferova Margarita Sergeevna, Belevtsev Andrey Mikhaylovich.* Analiz napravleniy razvitiya tekhnologiy monitoringa v usloviyakh bol'shogo ob"ema nestrukturirovannoy informatsii [Analysis of trends in the development of monitoring technologies in conditions of a large volume of unstructured information], *XXIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. P'yavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2020»* [XXIV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management" "Comtech-2020"].
11. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Poiskovye roboty dlya avtomatizirovannogo monitoringa informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Search robots for automated monitoring of information in general and special purpose networks], *18-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom» 2019 g.* [18th International Scientific and Practical Conference "Quality Management" 2019].
12. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Obshchaya kontseptsiya sozdaniya tekhnologii intellektual'nogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [The general concept of creating a technology for intelligent information retrieval in general and special purpose networks], *XXV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. P'yavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2021»* [XXV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management" "Comtech-2021"].
13. *Salton G. and Buckley C.* Term-weighting approaches in automatic text retrieval, *Information Processing & Management*, 1988, Vol. 24 (5), pp. 513-523.
14. *Jacob Devlin and Ming-Wei Chang.* Research Scientists, Google AI Language: Open Sourcing BERT: State-of-the-Art Pre-training for Natural Language Processing (англ.). Google, Inc, 2018.
15. *Charles L.A. Clarke, Gordon V. Cormack.* Dynamic Inverted Indexes for a Distributed Full-Text Retrieval System (англ.), *MultiText Project Technical Report MT-95-01. – University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada, 1995.*
16. *Pavlov Yu.N., Maystruk K.A.* Sravnenie metodov otsenki tonal'nosti teksta [Comparison of methods for assessing the tonality of the text], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2016, No. 12 (116), pp. 59-64.
17. *Liu X. and Croft W.B.* Cluster-based retrieval using language models, *In Proceedings of SIGIR '04*, 2004, pp. 186-193.
18. *Blei D.M., Ng A.Y., and Jordan M.J.* Latent Dirichlet allocation, *In Journal of Machine Learning Research*, 2003, No. 3, pp. 993-1022.
19. *Teh Y.W., Jordan M.L., Beal M.J., and Blei D.M.* Hierarchical Dirichlet processes, *Technical Report, Department of Statistics, UC Berkeley, 2004.*
20. Slovar' po kibernetike [Dictionary of Cybernetics], ed. by akademika V.S. Mikhalevicha. 2nd ed. Kiev: Glavnaya redaktsiya Ukrainskoy Sovetskoy Entsiklopedii imeni M.P. Bazhana, 1989, 751 p. (S48).
21. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Razrabotka algoritmov intellektual'nogo servisa poiska i monitoringa informatsii [Development of algorithms for intelligent information search and monitoring service], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3, pp. 6-17.

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

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

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

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

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

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-129-139

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

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КВАНТОВОГО КОДА ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК

Квантовая коррекция ошибок (ККО) требуется в квантовых компьютерах для смягчения влияния ошибок на физические кубиты. Цель состоит в том, чтобы оптимизировать нейронную сеть для высокой производительности декодирования, сохраняя при этом минималистическую аппаратную реализацию. Ошибки, связанные с декогеренцией, можно уменьшить, приняв схемы ККО, которые кодируют несколько несовершенных физических кубитов в логическое квантовое состояние, аналогично классической коррекции ошибок. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Разработка теории и принципов построения моделирующих систем, устойчивых к внешним помехам (зависимость искажения данных от зашумленности, зависимость ошибки квантового вычислительного процесса от меры и чистоты запутанности) для моделирования квантовых вычислений является динамичной областью, о чем свидетельствует большое количество существующих моделей отражающих те или иные квантовые вычислительные процессы и явления (квантовая телепортация, параллелизм, запутанность квантовых состояний) и научных трудов. Хотя квантовые вычисления еще не готовы к переходу от теории к практике, тем не менее, можно обоснованно догадываться какую форму, возможно, квантовый компьютер примет, или, что более важно для дизайнера языка программирования, по какому интерфейсу можно будет взаимодействовать с таким квантовым компьютером. Естественно применить уроки, извлеченные из программирования классических вычислений к квантовым вычислениям. Проведенный анализ работ данной области показал, что в настоящее время достигнут новый качественный уровень, открывающий перспективные возможности по реализации многокубитовых квантовых вычислений. Перспективы реализации и развития связаны не только с технологическими возможностями, но и с решением вопросов построения эффективных квантовых систем решения актуальных математических задач, задач криптографии и задач управления (оптимизации).

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

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

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A QUANTUM CODE FOR ERROR CORRECTION

Quantum error correction (QEC) is required in quantum computers to mitigate the impact of errors on physical qubits. The goal is to optimize the neural network for high decoding performance while maintaining a minimalistic hardware implementation. The errors associated with decoherence can be reduced by adopting QEC schemes that encode multiple imperfect physical qubits into a logical quantum state, similar to classical error correction. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of corrective codes to correct several types of quantum errors in the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this direction is expressed in the elimination of one of the shortcomings of the quantum computing process. The development of the theory and principles for constructing modeling systems that are resistant to external interference (dependence of data distortion on noise, dependence of the error of a quantum computing process on the measure and purity of entanglement) for modeling quantum computing is a dynamic area, as evidenced by a large number of existing models reflecting certain quantum computational processes and phenomena (quantum teleportation, parallelism, entanglement of quantum states) and scientific papers. Although quantum computing is not yet ready to move from theory to practice, it is nevertheless possible to reasonably guess what form a quantum computer might take, or, more importantly for programming language design, what interface it would be possible to interact with such a quantum computer. It is natural to apply the lessons learned from the programming of classical computing to quantum computing. The analysis of works in this area showed that a new qualitative level has now been reached, which opens up promising opportunities for the implementation of multi-qubit quantum computing. Prospects for implementation and development are associated not only with technological capabilities, but also with the solution of issues of building effective quantum systems for solving actual mathematical problems, cryptography problems and control (optimization) problems.

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

Введение. Вместо битов в традиционных компьютерах квантовые компьютеры [1] работают, контролируя и манипулируя квантовыми битами (кубитами [2]). Благодаря точному управлению квантовыми явлениями, такими как запутанность [3], такие устройства на основе кубитов в принципе могут превзойти свои классические аналоги. С этой целью были разработаны эффективные алгоритмы квантовых вычислений [4] с такими приложениями, как целочисленная факторизация [5], поиск, оптимизация и квантовая химия [6]. В настоящее время нет предпочтительной технологии кубитов; различные физические системы [7] изучаются для использования в качестве кубитов, включая фотоны, захваченные ионы [8], сверхпроводящие цепи [9] и спины в полупроводниках. Недостаток, общий для всех этих подходов, заключается в том, что трудно достаточно изолировать кубиты от воздействия внешнего шума [10], а это означает, что ошибки во время квантовых вычислений неизбежны. Напротив, биты в классическом компьютере обычно реализуются как надежные состояния включения/выключения транзисторных переключателей [11], которые различаются миллиардами электронов. Это обеспечивает классические биты с высокой допустимой погрешностью, что практически исключает отказы на физическом уровне. Для квантовых компьютеров, где кубиты реализованы как хрупкие квантовые системы [12], такой защиты от ошибок нет. Таким образом, любой квантовый компьютер с моделью схемы, основанный на текущих и будущих технологиях кубитов, потребует некоторого активного исправления ошибок [13].

Руководствуясь требованиями высокопроизводительных сетей связи и Интернета, существует хорошо разработанная теория классической коррекции ошибок. Однако адаптировать существующие классические методы для квантовой коррекции ошибок непросто. Кубиты подчиняются теореме о запрете клонирования, означающей, что квантовая информация не может быть продублирована так

же, как классическая информация. Кроме того, невозможно выполнить произвольные измерения кубитового регистра [14] из-за проблемы коллапса волновой функции. Первоначально опасались, что эти ограничения создадут непреодолимую проблему для жизнеспособности квантовых вычислений. Тем не менее, прорыв была достигнута в 1995 г. Питером Шором [15] в статье, предлагающей первую схему квантовой коррекции ошибок. Метод Шора [16] продемонстрировал, как квантовая информация может быть избыточно закодирована путем запутывания ее в расширенной системе кубитов. Последующие результаты продемонстрировали, что расширения этой техники в принципе могут быть использованы для произвольного подавления частоты квантовых ошибок при соблюдении определенных физических условий для самих кубитов. Именно благодаря этим разработкам в области квантовой коррекции ошибок область квантовых вычислений перешла от теоретического любопытства к практической возможности.

1. Классическое исправление ошибок. На заре классических вычислений ошибки были повсюду: ошибки памяти, ошибки в битах, передаваемых по каналу, неправильно применяемые инструкции и т. д. В настоящее время аппаратное обеспечение намного надежнее, но у нас также есть гораздо более совершенные «программные решения». ” для ошибок, в частности коды исправления ошибок. Такие коды берут строку данных и кодируют ее в более крупную строку («кодовое слово»), добавляя много избыточности, так что небольшая доля ошибок в кодовом слове не сможет уменьшить информацию о закодированных данных. Самый простой пример – это, конечно, повторяющийся код. Если мы хотим защитить бит b , мы можем повторить его три раза:

$$b \mapsto bbb.$$

Если хотим декодировать закодированный бит b из (возможно, поврежденно-го) 3-битного кодового слова, мы просто берем мажоритарное значение из 3 бит. Рассмотрим очень простую модель шума: каждый бит переворачивается (независимо от других битов) с вероятностью p . Тогда изначально, до применения кода, b имеет вероятность p перевернуться. Но если мы применим код повторения, вероятность того, что мажоритарное значение трех битов будет другим от b – это вероятность 2 или 3 битфлипов [17], которая равна $3p^2(1-p) + p^3 < 3p^2$. Следовательно, частота ошибок была снижена с p до менее чем $3p^2$. Если начальная частота ошибок p_0 была $< 1/3$, то новая частота ошибок $p_1 < 3p_0^2$ меньше, чем p_0 , и мы добились прогресса: частота ошибок в закодированном бите меньше, чем частота ошибок в не закодированном бите. Если бы мы хотели, чтобы он был еще меньше, мы могли бы соединить код с самим собой, т.е. повторить каждый из трех битов в коде три раза, чтобы длина кода стала равной 9. Это дало бы частоту ошибок $p_2 = 3p^2(1-p_1) + p_1^3 < 3p_1^3 < 27p_0^4$, что дает дальнейшее улучшение. Как мы видим, пока начальная частота ошибок p была не более $1/3$, мы можем уменьшить частоту ошибок до любого желаемого значения: к уровню конкатенации кодируют один «логический бит» в $3k$ «физических битов», но частота ошибок для каждого логического бита снижена до $\frac{1}{3}(3p_0)^{2^k}$. Это очень хорошая вещь: если начальная ошибка ниже $1/3$, то k уровней конкатенации увеличивают количество битов экспоненциально (в k), но уменьшают частоту ошибок в два раза экспоненциально быстро. Как правило, уже небольшой выбор k снижает частоту ошибок до незначительного уровня. Например, предположим, что мы хотим защитить некоторое полиномиальное (в некотором n) число битов для некоторого полиномиального числа временных шагов, и наша физическая частота ошибок является некоторой фиксированной величиной $p_0 < 1/3$. Выбор $k = 2 \log \log n$ уровней конкатенации

уже достаточно для этого, потому что тогда $p_k \leq \frac{1}{3}(3p_0)^{2^k} \approx 2^{-(\log n)^2} = n^{-\log n}$ стремится к 0 быстрее, чем любой многочлен. В этом случае, согласно границе объединения, даже вероятность существования ошибки где-либо среди наших полиномиально многих логических битов за полиномиальное количество временных шагов будет пренебрежимо малой. При таком выборе k каждый логический бит будет закодирован в $3^k = (\log n)^{2 \log_2 3}$ физических битов, поэтому мы увеличиваем количество битов только на полилогарифмический коэффициент.

2. От классической к квантовой коррекции ошибок. Классические информационные технологии используют двоичные кодировки, в которых данные представляются в виде последовательностей битов, принимающих значения «0» или «1». Основной принцип исправления ошибок заключается в том, что количество битов, используемых для кодирования заданного количества информации, увеличивается. Точный способ, которым достигается это избыточное кодирование, определяется набором инструкций, известным как код исправления ошибок. Простейшим примером кода с исправлением ошибок является трехбитовый повторяющийся код [18], кодировщик для которого дублирует каждое битовое значение $0 \rightarrow 000$ и $1 \rightarrow 111$. Более формально мы можем определить трехбитный кодер как отображение из необработанного двоичный алфавит B в кодовый алфавит C_3

$$B = \{0, 1\} \xrightarrow{\text{3-битовое кодирование}} C_3 = \{000, 111\}, \quad (1)$$

где закодированные битовые строки «000» и «111» называются логическими кодовыми словами кода C_3 . В качестве примера рассмотрим простой случай, когда мы хотим передать однобитовое сообщение «0» получателю в другом месте. Используя трехбитное кодирование, сообщение, которое мы отправим, будет кодовым словом «000».

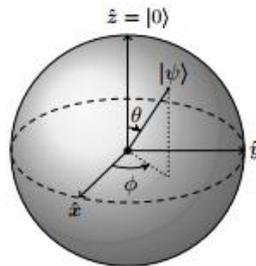


Рис. 1. В геометрическом представлении состояние кубита

$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$ можно представить в виде точки на поверхности сферы Блоха [19]

Теперь представьте, что сообщение подвергается единственной ошибке смежных битов во время передачи, так что получатель получает битовую строку «010». В этом сценарии получатель сможет сделать вывод, что предполагаемое кодовое слово «000» с помощью большинства голосов. То же самое будет верно для всех случаев, когда кодовое слово подвержено только одной ошибке. Однако, если кодовое слово подвержено двум ошибкам перестановки битов, большинство голосов приведет к неправильному кодовому слову. Последний сценарий, который следует рассмотреть, – это когда все три бита переворачиваются так, что кодовое слово «000» становится «111». В этом случае поврежденное сообщение также является кодовым словом: поэтому получатель не сможет узнать, что произошла ошибка.

Расстояние кода определяется как минимальное количество ошибок, которые таким образом заменят одно кодовое слово на другое. Мы можем связать расстояние d кода с количеством ошибок, которые он может исправить, следующим образом:

$$d = 2t + 1, \quad (2)$$

где t – количество ошибок, которые может исправить код. Ясно, что приведенное выше уравнение выполняется для трехбитового кода, где $t = 1$ и $d = 3$. В общем, коды исправления ошибок описываются в терминах нотации $[n, k, d]$, где n – общее количество битов в кодовом слове, k – количество закодированных битов (длина исходной битовой строки) и d – кодовое расстояние. В этом обозначении трехбитный код повторения помечен $[3, 1, 3]$.

3. От битов к кубитам. Вместо битов в классических системах фундаментальной единицей квантовой информации является кубит. Общее состояние кубита можно записать следующим образом

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (3)$$

где α и β – комплексные числа, удовлетворяющие условию $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Подробности относительно обозначений, которые используем для представления квантовых состояний, можно найти в приложении А. Кубиты могут кодировать информацию в суперпозиции своих базовых состояний, что означает квантовые состояния имеют доступ к вычислительному пространству, которое масштабируется как 2^n , где n – общее количество кубитов. Именно за счет использования суперпозиции в сочетании с другими квантовыми эффектами, такими как запутанность, можно построить алгоритмы, обеспечивающие квантовое преимущество. Однако если такие алгоритмы когда-либо будут реализованы на текущем или будущем квантовом оборудовании [20], необходимо будет исправить ошибки кубитов.

4. Оцифровка квантовых ошибок. В классической информации биты находятся либо в состоянии «0», либо в состоянии «1». Следовательно, единственным типом ошибки, который следует учитывать, является переворот битов, который принимает 0 1 и наоборот. Напротив, общее состояние кубита, определенное в уравнении (3), может принимать континуум значений между его базисными состояниями [21]. С точки зрения при разработке кодов исправления ошибок это свойство проблематично, поскольку означает, что кубит подвержен бесконечному количеству ошибок. Чтобы проиллюстрировать это более ясно, полезно переписать общее состояние кубита в терминах геометрического представления, заданного формулой

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle, \quad (4)$$

где амплитуды вероятности [22] поддерживают условие, что $\left| \cos \frac{\theta}{2} \right|^2 + \left| e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} \right|^2 = 1$.

В форме состояние кубита соответствует точке, определяемой углами θ и φ , на поверхности так называемой бловховской сферы. Пример состояния в этом представлении показан на рис. 1. Ошибки кубита могут возникать в результате различных физических процессов [23]. Простейшим случаем для изучения являются ошибки, которые заставляют кубит когерентно вращаться из одной точки на сфере Блоха в другую. Такие ошибки кубитов могут возникать, например, из-за систематических ошибок управления в оборудовании, с помощью которого реализуются кубиты. Математически когерентные ошибки [24] описываются унитарной [25] операцией $U(\delta\theta, \delta\varphi)$, которая изменяет состояние кубита следующим образом:

$$U(\delta\theta, \delta\varphi)|\psi\rangle = \cos \frac{\theta + \delta\theta}{2} |0\rangle + e^{i(\varphi + \delta\varphi)} \sin \frac{\theta + \delta\theta}{2} |1\rangle. \quad (5)$$

5. Поверхностный код. Задача создания квантовых кодов исправления ошибок заключается в поиске коммутирующих наборов стабилизаторов, которые позволяют обнаруживать ошибки, не нарушая закодированную информацию. Поиск таких наборов нетривиален, и для нахождения стабилизаторов с нужными свойствами требуются специальные конструкции кода. Реализация логического кубита с поверхностным кодом является ключевой целью многих усилий по созданию аппаратного обеспечения для квантовых вычислений.

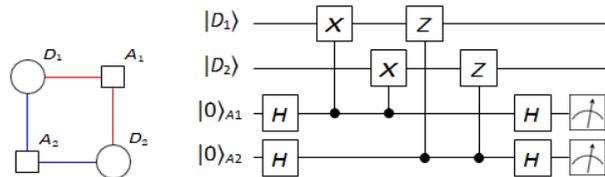


Рис. 2. Четырехтактный поверхностный код. а – изобразительное представление. Кодовые кубиты $D1$ и $D2$ представлены круглыми узлами; б – Эквивалентный четырехтактный поверхностный код в схемной записи

Поверхностные коды принадлежат к более широкому семейству так называемых топологических кодов. Общий принцип разработки топологических кодов заключается в том, что код строится путем «склеивания» повторяющихся элементов. С точки зрения фактической реализации конкретное преимущество поверхностного кода для современных аппаратных платформ заключается в том, что он требует взаимодействия только с ближайшими соседями. Это выгодно, поскольку многие платформы квантовых вычислений не могут выполнять высокоточные взаимодействия между кубитами на больших расстояниях.

6. Поверхностный код четырехтактный. Для поверхностных кодов полезно использовать графическое представление кодовых кубитов вместо обозначения схемы, которое мы использовали до сих пор. На рис. 2,а показан четырехтактный поверхностный код – фундаментальный строительный блок, вокруг которого строятся поверхностные коды. Круги на рис. 2,а представляют кодовые кубиты, а квадраты – вспомогательные кубиты. Красные ребра представляют управляемые X-вентильаторы, каждый из которых управляется вспомогательным кубитом А и воздействует на кубит данных D. Аналогичным образом синие ребра представляют управляемые Z-операции, каждая из которых управляется вспомогательным кубитом и воздействует на кубит данных. Эти контролируемые операции являются воротами, с помощью которых измеряются стабилизаторы четырехтактного цикла. Вспомогательный кубит $A1$ соединяется с кубитами данных $D1$ и $D2$ красными ребрами и, следовательно, измеряет стабилизатор $XD1 XD2$. Точно так же вспомогательный кубит $A2$ измеряет стабилизатор $ZD1 ZD2$. Для сравнения, четырехцикл показан в обозначениях квантовой схемы на рис. 2,б. Стабилизаторы четырехцикла $XD1 XD2$ и $ZD1 ZD2$ коммутируют друг с другом, поскольку нетривиально пересекаются на четном числе кодовых кубитов. В этом легко убедиться, просмотрев рис. 2,б. Кодовое слово $|0\rangle$ четырехциклового цикла можно подготовить, установив начальное состояние кодовых кубитов в $D1D2 = 00$ и следуя общей процедуре кодирования. Однако, поскольку четырехцикл имеет два кодовых кубита $n = 2$ и два стабилизатора $m = 2$, число кодируемых им логических кубитов равно $k = n, m = 0$. В результате четырехцикл сам по себе не является полезный код. Однако мы увидим, что работающие коды обнаружения и исправления могут быть сформированы путем объединения нескольких четырехциклов в квадратные решетки.

Алгоритм 1. Квантовое вариационное обучение для квантовых кодов с исправлением ошибок

Input: набор ошибок E , аппаратно-эффективный ВКС $U(\theta)$ с L слоями, приемлемое количество слоев L_{\max} , приемлемый допуск по стоимости $C_{tol}^{l_1}$.

Output: приближительный квантовый код с аппаратно-эффективным кодировщиком, обнаруживающим E .

while $L \leq L_{\max}$ и $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}(\theta) > C_{tol}^{l_1}$ **do**

while $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}(\theta)$ не сходится **do**

Выберите подмножество $\varepsilon_S \subset \varepsilon$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)$, выведите $\{|\psi_j\rangle\}$.

Измерьте наблюдаемые $E_\mu \in \varepsilon_S$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)E_\mu U(\theta)$ для $E_\mu \in \varepsilon_S$.

Реализуйте проективные измерения.

Оцените $C_{n,K,\varepsilon_S}^{l_2}(\theta)$ и его градиент.

Выполните шаг градиентного спуска, обновите θ .

end

if $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}(\theta) < 0,01$, **then**

while $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}(\theta)$ не сходится **do**

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)$, выведите $\{|\psi_j\rangle\}$.

Измерьте наблюдаемые $E_\mu \in \varepsilon$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)E_\mu U(\theta)$ для каждого $E_\mu \in \varepsilon$.

Оценка $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}(\theta)$ и его градиент.

Свести к минимуму $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}(\theta)$, обновить θ .

end

end

$L \leftarrow L + 1$.

end

$\theta_{opt} \leftarrow \theta$.

Return: θ_{opt} , $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}(\theta_{opt})$.

7. Отказоустойчивость. До сих пор при обсуждении кодов квантовой коррекции ошибок мы предполагали, что ошибки возникают только в определенных местах схемы. Например, на принципиальной схеме двухкубитного кода, показанной на рис. 2, ошибки ограничены областью, обозначенной буквой «E». При этом мы предполагаем, что весь аппарат, связанный с кодированием и выделением синдромов, работает безошибочно. Однако на практике это не так. Фактически, для многих технологий квантовых вычислений двухкубитные вентили, а также операции измерения могут быть доминирующими источниками ошибок. Таким образом, нереально предполагать, что какая-либо часть схемы не содержит ошибок. Код с квантовой коррекцией ошибок считается отказоустойчивым, если он может учитывать ошибки, возникающие в любом месте схемы. Существуют различные ме-

тоды модификации квантовых схем, чтобы сделать их отказоустойчивыми. Проще говоря, эти методы гарантируют, что небольшие погрешности на малых расстояниях не будут бесконтрольно распространяться по цепи. Модификация схемы квантовой коррекции ошибок для обеспечения отказоустойчивости может привести к значительным накладным расходам с точки зрения общего количества необходимых дополнительных вспомогательных кубитов. Например, процедура выделения отказоустойчивого синдрома, предложенная Шором, требует λ вспомогательных кубитов для измерения каждого стабилизатора, где λ – количество неидентичных элементов в стабилизаторе. В этой схеме для измерения двух стабилизаторов четырехкубитного кода, изображенного на рис. 5, потребуется восемь вспомогательных кубитов. Существуют более эффективные схемы, но отказоустойчивая версия кода всегда будет иметь повышенные накладные расходы по сравнению с оригинальной схемой. Для квантовой схемы с зашумленными вспомогательными измерениями не всегда возможно декодировать код исправления ошибок за один цикл извлечения синдрома. Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрим случай, когда синдром $S = 10$ измеряется в трехкубитном коде. Этот синдром вызван ошибкой $X1$. Однако, если сами вспомогательные устройства подвержены ошибкам, то тот же самый синдром мог бы также возникнуть в результате ошибки вспомогательных кубит $A1$. Чтобы различать эти две возможности, необходимо провести два (или более) раунда измерений стабилизаторов и сравнить синдромы во времени. Следует отметить, что декодирование с течением времени таким способом, помимо любых других модификаций, необходимых для отказоустойчивости, будет снижать порог для кода. Например, порог для поверхностного кода с зашумленными вспомогательными измерениями составляет $\approx 1\%$ по сравнению с $\approx 10\%$ в идеальном случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что идея квантового компьютера была высказана еще Р. Фейнманом в 1982 г. До сих пор проводятся научные исследования по этой тематике. Исправление ошибок – одна из основных задач, стоящих перед квантовыми вычислительными устройствами. И без решения данной проблемы, дальнейшие успешные разработки в этой многообещающей области станут неэффективными. В данной работе численно смоделированы коды коррекции различных видов ошибок. Проанализированы основные препятствия и трудности на пути защиты канала [26] от шума, а также предложены некоторые методы их преодоления. Произведена реализация схем исправления основных типов квантовых ошибок.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Calderbank A.R., Shor P.W.* Good quantum error-correcting codes exist // *Phys Rev A.* – 1996. – Vol. 54. – P. 1098-1106.
2. *Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al.* Fault-tolerant quantum error detection // *Science Advances.* – 2017. – 3 (10):e1701074. – <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. *Vuillot C.* Is error detection helpful on IBM 5q chips? // *Quantum Information and Computation.* – 2018. – Vol. 18, No. 11-12. – P. 0949-0964.
4. *Harper R., Flammia S.T.* Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience // *Phys Rev Lett.* – 2019. – 122:080504. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. *Wootton J.R., Loss D.* Repetition code of 15 qubits. *Physical Review A.* – 2018. – Vol. 97 (5). – <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. *Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al.* Simulated quantum computation of molecular energies // *Science.* – 2005. – Vol. 309 (5741). – P. 1704-1707. – <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.

7. Knill M., Laflamme R., and Zurek W. Threshold accuracy for quantum computation. *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. Гушанский С.М., Потанов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
9. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
10. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потанов В.С. Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 76-86.
11. Kleppner D., Kolenkow R. *An Introduction to Mechanics* (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
12. Потанов В.С., Гушанский С.М. Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТСАНУ-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.
13. Gushansky S., Rykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V. Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors // The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic. – P. 64-73.
14. Hales S. Hallgren An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000. – P. 515.
15. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016. – P. 20-26.
16. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Models of a quantum computer, their characteristics and analysis // 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015. – P. 583-587.
17. Collier D. The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II*. American Science Association. Washington, DC, 1993. – P. 105-119.
18. Olukotun K. *Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency*. – Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator // *Computer Physics Communications*. – Vol. 176. – P. 121-136.
20. Williams C.P. *Explorations in Quantum Computing // Texts in Computer Science*. Chapter 2 “Quantum Gates”. – Springer, 2011. – P. 51-122.
21. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation // In: *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems*. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 763. – P. 198-207.
22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2002. – Vol. 48. – 2637.
23. Milner R.G. A Short History of Spin // In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. – arXiv:1311.5016. 2013.
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // In: *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Redondo Beach, CA. – IEEE, 2000. – P. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In: *Proceedings of Eurocrypt*. – 2013. – P. 592-608
26. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.

REFERENCES

1. Calderbank A.R., Shor P.W. Good quantum error-correcting codes exist, *Phys Rev A*, 1996, Vol. 54, pp. 1098-1106.
2. Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al. Fault-tolerant quantum error detection, *Science Advances*, 2017, 3 (10):e1701074. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. Vuillot C. Is error detection helpful on IBM 5q chips?, *Quantum Information and Computation*, 2018, Vol. 18, No. 11-12, pp. 0949-0964.
4. Harper R., Flammia S.T. Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience, *Phys Rev Lett.*, 2019, 122:080504. Available at: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. Wootton J.R., Loss D. Repetition code of 15 qubits, *Physical Review A*, 2018, Vol. 97 (5). Available at: <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al. Simulated quantum computation of molecular energies, *Science*, 2005, Vol. 309 (5741), pp. 1704-1707. Available at: <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.
7. Knill M., Laflamme R., and Zurek W. Threshold accuracy for quantum computation. *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methodology of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
9. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3, pp. 223-233.
10. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Kolichestvennye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3, pp. 76-86.
11. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
12. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of error on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSaiU-2016* [Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, graduate students and students of ITSaiU-2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.
13. Gushanskiy S., Pykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V. Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors, *The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic*, pp. 64-73.
14. Hales S. Hallgren An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12-14, 2000*, pp. 515.
15. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties, *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016*, pp. 20-26.
16. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Models of a quantum computer, their characteristics and analysis, *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015, pp. 583-587.
17. Collier D. The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II*. American Science Association. Washington, DC, 1993, pp. 105-119.
18. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, Vol. 176, pp. 121-136.
20. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing, *Texts in Computer Science. Chapter 2 "Quantum Gates"*. Springer, 2011, pp. 51-122.

21. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, In: *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2019, Vol. 763, pp. 198-207.
22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, 2637.
23. Milner R.G. A Short History of Spin, In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. arXiv:1311.5016. 2013.
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, In: *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA*. IEEE, 2000, pp. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, In: *Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608
26. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Г.В. Куповых.

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

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Божич Владимир Иванович – Ростовский государственный экономический университет; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634375501; кафедра естественных и безопасности жизнедеятельности; к.т.н.; профессор.

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

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; the department of computer engineering; assistant.

Bozhich Vladimir Ivanovich – Rostov State Economic University; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634375501; the department of natural science and life safety; cand. of eng. sc.; professor.

УДК 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-139-147

В.И. Данильченко, В.М. Курейчик

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТРИБУТИВНОЙ СЕМАНТИКИ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗНАЧИМЫХ СОЧЕТАНИЙ ЗАГОЛОВКОВ НЕСКОЛЬКИХ КОЛЛЕКЦИЙ ТЕКСТОВ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются методы формирования специальных моделей представления различных наборов знаний в различных информационных системах. Работа посвящена применению дистрибутивной семантики при выделении значимых сочетаний в одной предметной области (ПрО) в рамках формализации лингвистической экспертной информации (ЛЭИ). В работе применяется подход к формализации ЛЭИ на основе набора аналитических методов, где в качестве моделей используется линейная алгебра. Такой подход дает

возможность инициализировать процедуру автоматического формирования иерархических архитектур ЛЭИ или дендрограмм при выделении значимых сочетаний заголовков нескольких коллекций текстов. Научная новизна заключается в предложенном аналитическом подходе с применением дистрибутивной семантики при выделении значимых сочетаний заголовков нескольких коллекций текстов, который позволяет проводить анализ и обработку лингвистической экспертной информации. Отличительной характеристикой предложенного подхода является возможность формализовать Про «Методы глобальной оптимизации» на основе синтеза различных уже существующих иерархий рассматриваемой Про. В работе преследуется задача создать условия для формализации ЛЭИ путем применения дистрибутивной семантики при выделении значимых сочетаний заголовков нескольких коллекций. Практическая ценность работы заключается в разработке нового подхода в формализации ЛЭИ с учетом дистрибутивной семантики при выделении значимых сочетаний заголовков нескольких коллекций текстов. Так же в работе построена онтология в owl формате «Методы глобальной оптимизации» в программе «Protege». Онтология построена на основе связанных данных Про. Построенная в данной работе онтология, дополняет структуру поиска в рамках рассматриваемой Про и может быть дополнена и развита в дальнейшем.

Методы глобальной оптимизации; системы управления обучением; онтология; предметная область систем электронного обучения; программа «Protege»; формализация ЛЭИ; дистрибутивная семантика.

V.I. Danilchenko, V.M. Kureichik

THE USE OF DISTRIBUTIVE SEMANTICS IN THE IDENTIFICATION OF SIGNIFICANT COMBINATIONS OF TITLES OF SEVERAL TEXT COLLECTIONS IN THE FORMALIZATION OF LINGUISTIC EXPERT INFORMATION

The paper discusses methods of forming special models for the representation of various sets of knowledge in various information systems. The work is devoted to the application of distributive semantics in the identification of significant combinations in one subject area (PRO) within the framework of the formalization of linguistic expert information (LEI). The paper applies an approach to the formalization of LEI based on a set of analytical methods, where linear algebra is used as models. This approach makes it possible to initialize the procedure for the automatic formation of hierarchical architectures of LEI or dendrograms when identifying significant combinations of titles of several collections of texts. The scientific novelty lies in the proposed analytical approach using distributive semantics in identifying significant combinations of titles of several collections of texts, which allows for the analysis and processing of linguistic expert information. A distinctive characteristic of the proposed approach is the ability to formalize the ABM "Global Optimization Methods" based on the synthesis of various already existing hierarchies of the ABM under consideration. The paper aims to create conditions for the formalization of the LEI by applying distributive semantics when identifying significant combinations of titles of several collections. The practical value of the work lies in the development of a new approach to the formalization of LEI, taking into account distributive semantics when identifying significant combinations of titles of several collections of texts. The ontology in owl format "Methods of global optimization" in the program "Protege" is also built in the work. The ontology is built on the basis of related data about. The ontology constructed in this work complements the search structure within the framework of the considered PRO and can be supplemented and developed in the future.

Methods of global optimization; learning management systems; ontology; subject area of e-learning systems; Protege program; LEI formalization; distributive semantics.

Введение. На данный момент, определение дистрибуции является одной из основных частей комбинаторной лингвистики, которая работает с синтагматическими отношениями различных моделей в языке и речи и их производные. Дистрибуция как понятие находится в одной группе с семантикой, сочетаемостью валентностью и контекстом [1–3].

Дистрибутивная семантика или векторная модель слов, представляет собой направление научных исследований, где изучается степени семантической близости в области языковых единиц в больших массивах лингвистических информации [2–4]. Такие модели все больше набирают популярность как в теоретических исследованиях, так и в практическом применении, так как, позволяют решить разнообразный спектр задач.

Рассматривая работы [2–8], можно представить архитектуру комбинаторной лингвистики, которая представлена на рис. 1. Все входящие понятия находятся в связанности и взаимозависимости. Задача комбинаторной лингвистики складывается из двух основных аспектов: уровень языковой, на основе валентности и уровень речевой на основе сочетаемости. Стоит отметить, что термин «дистрибуция» в литературе встречается в разных значениях. Первое значение – совокупность всех приближенных понятий данной ПрО. Второе значение – совокупность всех языковых сочетаний исследуемой ПрО.

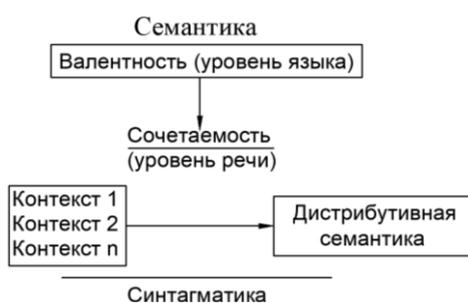


Рис. 1. Архитектура комбинаторной лингвистики

В случае, когда дистрибуция принимается как совокупность всех контекстов ПрО, рассматриваемые значения считаются не дифференцируемыми. Дистрибутивная семантика разделяется по параметрам: тип текста и размер текста; значение частоты встречаемости языковой единицы в исходном тексте; значение расстояния между векторами языковых единиц; значение размерности матрицы;

Концепция семантических векторных пространств (СВП) представлена в работе [7]. Основная идея такого подхода заключается в представлении каждой языковой единицы в исходном тексте в виде точки в пространстве, иными словами сумма векторов в одном векторном поле. Соседние точки в пространстве принимаются как схожие по тематике. Поисковый запрос тоже принимается за точку в этом же пространстве и инициализируется системой как документ. Сортировка документов происходит порядке уменьшения семантической близости от запроса, иными словами, в порядке возрастания расстояния от точки до точки поискового запроса. Такая система показала перспективные результаты на современных задачах. В настоящее время эта система активно используется и модернизируется, в частности, ведутся проекты по исследованию унификации модели СВП для эффективного выявления семантических связей из коллекций текстов [7–9]. Модернизация известных методов инициализации СВП происходит посредством применения значимых словосочетаний (ЗС), а не отдельных языковых единиц. Рассматриваемые ЗС или лексические векторы, имеют свойство взаимной повторяемости.

Интерес к современным моделям СВП растет количеством источников информации, развитием разных по структуре типов хранения данных, наличие разнообразных данных в больших массивах приводит к необходимости улучшения существующих методов их сортировки и последующей обработки. Описанная проблема подтверждает актуальность настоящей работы.

Подход к формализации ЛЭИ. В предложенном подходе используются принципы линейной алгебры в качестве способа инициализации модели ЛЭИ. Информационный комплекс взаимосвязанных функций лингвистических единиц рассматривается как набор векторов. В такой модели, семантическая близость лингвистических единиц рассматривается как расстояние между векторами. Полученный набор векторов формирует исходную матрицу, где вектор должен соответствовать рассматриваемому контексту.

Расстояние между векторами может быть определено различными методами. В работе используется наиболее распространённый метод косинусной меры [8]:

$$\frac{xy}{|x||y|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}. \quad (1)$$

В работе используются статистические меры: ассоциации и ассоциативной связанности. Такие механизмы позволяют определить связанность между связанными векторами [9]. Так же в работе применяется мера, рассмотренная в работе [10], которая сравнивает частоты связанных векторов с независимыми векторами. Если такое значение больше заданного значение, то связка векторов рассматривается как константа. Такая мера обозначается Mi и определяется следующим образом [10]:

$$Mi = \log_2 \frac{f(n,c) \cdot N}{f(n) \cdot f(c)}, \quad (2)$$

где n – первое слово вектора, c – второе слово вектора, $f(n, c)$ – частота двух зависимых вектора, $f(n)$ и $f(c)$ – абсолютные частоты каждого вектора, N – общее число векторов.

В данной работе так же используется мера Ms , которая определяет вероятность сходства двух или более векторов [11]:

$$Ms = \frac{f(n,c) - \frac{f(n) \cdot f(c)}{N}}{f(n,c)}. \quad (3)$$

И мера Ml , которая отражает логарифмическую функцию правдоподобия, такая мера рассматривалась в работе [12]:

$$Ml = 2 \sum_{i=1}^n f(n, c) \cdot \log_2 \frac{f(n,c) \cdot N}{f(n) \cdot f(c)}. \quad (4)$$

В данной работе применен метод «мешок термов» [13], рассмотрим более подробно представление искомого документ d_i в виде вектор-столбца. Длина вектор-столбца определена длиной N_w , где u_{ij} – элемент терма w_j в данном векторе. Матрица D_{ij} – двумерный массив документов ЛЭИ, где u_{ij} – элементы данного массива.

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1i} & \dots & u_{1N_D} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{j1} & \dots & u_{ji} & \dots & u_{jN_D} \\ \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N_w 1} & \dots & u_{N_w i} & \dots & u_{N_w N_D} \end{bmatrix}, \dim(D_{ij}) = N_w \cdot N_d, \quad (5)$$

где $j = \overline{1, N_{wd_i}}$ – номер строки, w_j порядковый номер каждого терма; $j = \overline{1, N_d}$ – номер столбца.

Множество документов D представляется известным, при этом каждый документ $d_i \in D$ – случайная независимая выборка термов, которая создана подмножеством T . Условное распределение термов в документах $p(w|d)$ можно найти по частотам термов [13]. Получим матрицу распределения тем по документам $O = (\theta_{ki})$ [11–14]:

$$O_{ki} = \begin{bmatrix} p(t_1|d_1) & \cdots & p(t_1|d_i) & \cdots & p(t_1|d_{N_D}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(t_k|d_1) & \cdots & p(t_k|d_i) & \cdots & p(t_k|d_{N_D}) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(t_{N_T}|d_1) & \cdots & p(t_{N_T}|d_i) & \cdots & p(t_{N_T}|d_{N_D}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\dim(O) = N_T \cdot N_D$; $k = \overline{1, N_T}$ – номер строки; $i = \overline{1, N_D}$ – номер столбца; $p(t_k|d_i)$ – вероятность нахождения k -го термина в i -м разделе; O^i – вектор столбец раздела t_k .

Полученная матрица тем с применением словаря терминов ПрО, переносится в пространство (вектор) понятий.

Отметим, что в реальных приложениях такого рода матрицы будут очень большими – порядка миллионов столбцов (строк). Однако благодаря тому, что подавляющее большинство элементов будет заполнено нулями, реально хранимая информация будет вполне обозримой. Для нахождения ассоциативных связей, которые могут войти в ассоциативный портрет, необходимо выбрать из этой матрицы пары терминов с самыми большими коэффициентами семантической близости (косинусной меры).

Построение онтологической модели. Рассмотрим пример построение онтологической модели методов глобальной оптимизации, используя описанные в данной работе подходы.

Согласно рассмотренных работ [15–18], можно выделить смысловые группы. Первая группа «Эвристические и метаэвристические подходы» включает эволюционные, поисковые, роевые и миметические методы, где эволюционные разделяются: дифференциальная эволюция; эволюционное программирование; эволюционные стратегии; генетические алгоритмы. Методы роевого интеллекта разделяются: ствольных клеток, колонии белых кротов, колонии пчел, колонии муравьев и рой частиц. Вторая группа «Детерминированные подходы» включает методы: алгебраической геометрии, ветвей и границ. Третья группа «стохастические и термодинамические подходы» включает непрерывные, стохастическое моделирование, Монте-Карло, имитация отжига. Отметим, что возможны переходы из одной группы в другую [19].

Онтологическая модель предметной области «Методы глобальной оптимизации» в программе Protege, представленной на рис. 2. Далее представлен ее онтограф (рис. 3).

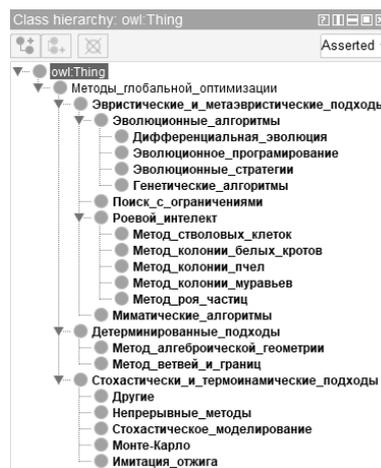


Рис. 2. Онтологическая модель предметной области «Методы глобальной оптимизации»

Онтограф (рис. 3), рассмотренной предметной области «Методы глобальной оптимизации», более наглядно отражает деление классов и индивидуальные объекты.

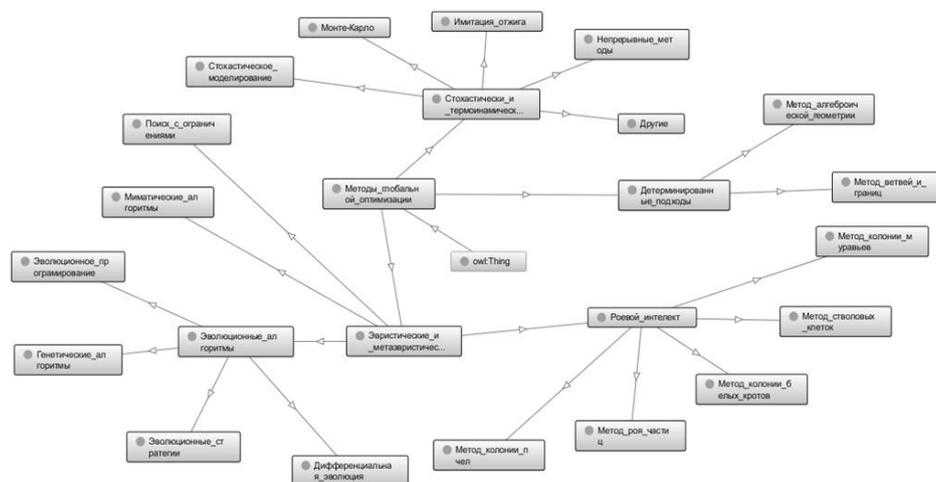


Рис. 3. Онтологическая модель предметной области «Методы глобальной оптимизации»

Проведя комплексный статистический анализ предметной области «Методы глобальной оптимизации», была построена онтологическая модель по способу группировки в виде коллекции [19, 20].

Заключение. В ходе работы была создана простая онтология (таксономия) по предметной области «Методы глобальной оптимизации», имеющей вид ориентированного графа, вершинами которого являются классы, дугами – свойства, представляющие направленные отношения или связи между ними. Построенная онтология является, по сути, каркасом, представлением предметной области «Методы глобальной оптимизации». Онтологию можно расширять, путем автоматической интеграции таксономических структур, согласно предложенному в работе методу, добавлять новые связи между объектами и увеличивать количество характеристик каждого экземпляра. Разработанная онтология позволяет оперативно проводить информационный поиск в базе знаний, определять взаимосвязь между онтологическими понятиями, использоваться для проведения контент-анализа.

Перспективой дальнейшей разработки темы является разработка метода согласования выходных данных, представленных матричной структурой иерархических связей понятий, с форматом типа связанные данные, что обеспечит автоматизацию представления онтологии в owl формате.

Поддержка. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 75-79.
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. *Семенова А.В.* Разработка лингвистической онтологии узкой предметной области // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика. – ПАРУСА-2015*: Сб. трудов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Геленджик, 29-30 октября 2015 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 201-209.
5. *Запорожец Д.Ю., Кравченко Ю.А., Лежебоков А.А.* Способы интеллектуального анализа данных в сложных системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 3. – С. 52-54.
6. *Semenova A.V., Kureychik V.M.* Application of Swarm Intelligence for Domain Ontology Alignment // Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ИТИ'16). – 2016. – P. 1-7.
7. *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.
8. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases // European Microwave Week. 2014, Rome, Italy. – P. 520-523.
9. *Bagheri E., Ensan F., Feng Y., Jovanovic J.* The State of the Art in Semantic Relatedness: a Framework for Comparison // The Knowledge Engineering Review. – 2017. – Vol. 32. – P. 1-30.
10. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл.* Архитектура гибридного поиска при проектировании // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7. – С. 22-27.
11. *Кравченко Ю.А.* Управление знаниями как одно из направлений развития технологий открытого образования // Открытое образование. – 2015. – № 3. – С. 71-76.
12. *Kravchenko Y.A., Bova V.V., Kursitys I.O.* Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing // Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry». – 2016. – Vol. 1. – P. 287-295.
13. *Kravchenko Y.A., Kuliev E.V., Kursitys I.O.* Information's Semantic Search, Classification, Structuring and Integration Objectives in the Knowledge Management Context Problems // Conference proceedings. 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. – 2016. – P. 136-141.
14. *Kravchenko Y.A., Kureichik V.I., Zaporozhets D.Yu., Zaruba D.V.* Information and Knowledge Integration Based on Simulation Modeling // 9th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies. – 2015. – P. 22-24.
15. *Kozierkiewicz-Hetmanska A., Pietranik M.* The Knowledge Increase Estimation Framework for Ontology Integration on the Concept Level // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. – 2017. – Vol. 32. – P. 1161-1172.
16. *Davidekova M., Gregu M.* Software Application Logging: Aspects to Consider by Implementing Knowledge Management // 2nd International Conference on Open and Big Data. – 2016. – P. 102-107.
17. *Kalkowski E., Sick B., Fisch D.* Knowledge Fusion for Probabilistic Generative Classifiers with Data Mining Applications // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2014. – Vol. 26. – P. 652-666.
18. *Карабач А.Е.* Системы интеграции информации на основе семантических технологий // Наука, техника и образование. – 2014. – № 2 (2). – С. 58-62.
19. *Hernich A., Lutz C., Papacchini F., Wolter F.* Dichotomies in Ontology-Mediated Querying with the Guarded Fragment // 36th Symposium on Principles of Database Systems. – 2017. – P. 185-199.
20. *Semenova A.V., Kureychik V.M.* Multi-objective particle swarm optimization for ontology alignment // 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – 2016.

REFERENCES

1. *Danil'chenko V.I., Kureychik V.M.* Geneticheskiy algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm of VLSI placement planning], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2, pp. 75-79.
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. DIO: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
4. *Semenova A.V.* Razrabotka lingvisticheskoy ontologii uzkoj predmetnoy oblasti [Development of linguistic ontology of a narrow subject area], *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i avtomatika. – PARUSA-2015*: Sb. trudov IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, g. Gelendzhik, 29-30 oktyabrya 2015 g.* [Automation problems. Regional management. Communication and automation. – SAILS-2015*: Proceedings of the IV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, post-graduates and students, Gelendzhik, October 29-30, 2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, Vol. 1, pp. 201-209.
5. *Zaporozhets D.Yu., Kravchenko Yu.A., Lezhebokov A.A.* Sposoby intellektual'nogo analiza dannykh v slozhnykh sistemakh [Methods of data mining in complex systems], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, No. 3, pp. 52-54.
6. *Semenova A.V., Kureychik V.M.* Application of Swarm Intelligence for Domain Ontology Alignment, *Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'16)*, 2016, pp. 1-7.
7. *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.
8. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, *European Microwave Week. 2014, Rome, Italy*, pp. 520-523.
9. *Bagheri E., Ensan F., Feng Y., Jovanovic J.* The State of the Art in Semantic Relatedness: a Framework for Comparison, *The Knowledge Engineering Review*, 2017, Vol. 32, pp. 1-30.
10. *Kureychik V.V., Kureychik V.V.* Arkhitektura gibridnogo poiska pri proektirovanii [Architecture of hybrid search in design] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7, pp. 22-27.
11. *Kravchenko Yu.A.* Upravlenie znaniyami kak odno iz napravleniy razvitiya tekhnologiy otkrytogo obrazovaniya [Knowledge management as one of the directions of development of open education technologies], *Otkrytoe obrazovanie* [Open education], 2015, No. 3, pp. 71-76.
12. *Kravchenko Y.A., Bova V.V., Kursityis I.O.* Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing, *Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry»*, 2016, Vol. 1, pp. 287-295.
13. *Kravchenko Y.A., Kuliev E.V., Kursityis I.O.* Information's Semantic Search, Classification, Structuring and Integration Objectives in the Knowledge Management Context Problems, *Conference proceedings. 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 2016, pp. 136-141.
14. *Kravchenko Y.A., Kureichik V.V., Zaporozhets D.Yu., Zaruba D.V.* Information and Knowledge Integration Based on Simulation Modeling, *9th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies*, 2015, pp. 22-24.
15. *Kozierkiewicz-Hetmanska A., Pietranik M.* The Knowledge Increase Estimation Framework for Ontology Integration on the Concept Level, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2017, Vol. 32, pp. 1161-1172.
16. *Davidekova M., Gregu M.* Software Application Logging: Aspects to Consider by Implementing Knowledge Management, *2nd International Conference on Open and Big Data*. 2016, pp. 102-107.

17. Kalkowski E., Sick B., Fisch D. Knowledge Fusion for Probabilistic Generative Classifiers with Data Mining Applications, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2014, Vol. 26, pp. 652-666.
18. Karabach A.E. Sistemy integratsii informatsii na osnove semanticheskikh tekhnologiy [Information integration systems based on semantic technologies], *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education], 2014, No. 2 (2), pp. 58-62.
19. Hernich A., Lutz C., Papacchini F., Wolter F. Dichotomies in Ontology-Mediated Querying with the Guarded Fragment, *36th Symposium on Principles of Database Systems*, 2017, pp. 185-199.
20. Semenova A.V., Kureychik V.M. Multi-objective particle swarm optimization for ontology alignment, *10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 2016.

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

Данильченко Владислав Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79526088561; кафедра САПР.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: 88634311487; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79526088561; the department of computer-aided design; postgraduate.

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

УДК 004.272

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-147-158

Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев, А.Э. Саак

ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬЦЕВОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ РЕСУРСОВ В ГРИД-СИСТЕМАХ*

Статья посвящена решению задачи распределения вычислительно-временных ресурсов в грид-системах на основе адаптации используемых полиномиальных алгоритмов к квадратичным типам заявок пользователей. Актуальность задачи обоснована значительным ростом востребованности парадигмы распределенных вычислений в условиях информационного переполнения и неопределенности. В статье рассмотрены проблемы диспетчирования гетерогенных вычислительных ресурсов при решении сложных профессиональных и научных задач, поступающих в различные моменты времени, на основе классификации по значимым признакам соответствия и готовности ресурса. Проведен сравнительный обзор существующих аналогов. Сформулирована постановка решаемой задачи в контексте выбранной тематики исследования. Обоснована проблема диспетчирования грид-систем с централизованной архитектурой, которая использует технологию мульти-сайтного выполнения задач. Применение данной архитектуры требует разработки эвристических алгоритмов распределения вычислительных ресурсов с функцией учета свойств массивов заявок пользователей и оценки соответствия распорядка. Исключение возникновения ошибок диспетчирования требует разработки формального аппарата, который будет выявлять закономерности множества заявок, введет их типизацию и построит эвристические алгоритмы с оценкой качества, адаптированные под соответствующие типы. Разработка такого формального аппарата несомненно является актуальной задачей. Не менее важной задачей в рамках создания данного аппарата является построение модели паритетности ресурсов и моделей взаимодействия пользователей и вычислительной

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00148.

системы. Авторами предложено решать задачу диспетчирования вычислительных ресурсов на основе разработки и исследования полиномиальных алгоритмов диспетчирования массивами заявок гиперболического типа. Основной теоретической значимостью данного исследования является создание формального аппарата среды диспетчирования, включающего определение ресурсного прямоугольника, как модели заявки пользователя, на основе выполнения операций в среде диспетчирования над этими ресурсными прямоугольниками. Научная новизна исследования заключается в разработке центрально-кольцевого полиномиального алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов в грид-системах, который отличается от существующих алгоритмов диспетчирования вычислительных систем адаптацией к квадратичным типам заявок пользователей и позволяет повысить эффективность распределения вычислительно-временных ресурсов. Для оценки эффективности предложенного алгоритма разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент с разным количеством сформированных классов вычислительных ресурсов. Полученные сравнительные результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают эффективность предложенного алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов. Описанные исследования имеют высокий уровень теоретической и практической значимости и напрямую связаны с решением классических задач искусственного интеллекта.

Диспетчирование; параллельные вычисления; grid-системы; распределенные вычислительные ресурсы; центрально-кольцевой полиномиальный алгоритм; централизованная архитектура.

D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev, A.E. Saak

CENTRAL-RING POLYNOMIAL ALGORITHM FOR DISTRIBUTION OF COMPUTATION-TIME RESOURCES IN GRID SYSTEMS

The article is devoted to solving the problem of computational and time resources distribution in grid systems based on the adaptation of polynomial algorithms to quadratic types of user applications. The relevance of demand distribution validity problem for the distributed computing paradigm in the context of information redistribution and uncertainty. The article deals with the problems of scheduling heterogeneous computing resources in solving complex professional and scientific problems achieved at different points in time, based on identifying resources by significant manifestations of commitment and probability. A comparative review of consumption has been carried out. The statement of the problem to be solved in the chosen research area is formulated. The problem of scheduling a grid system with a centralized multiarchitecture, which uses the task solution of a group-site, is substantiated. The use of this architecture requires the development of heuristic algorithms for the distribution of computing resources, taking into account the properties of application arrays and assessing the schedule compliance. Eliminating the occurrence of scheduling errors requires the development of a formal apparatus that will identify the prospects of the application, introduce their typing and build heuristic algorithms with quality assessment, selected for certain types. The development of such a formal apparatus is an urgent task. An equally important task within the framework of this mechanism is the construction of resource parity models and interaction between users and the computing system models. The authors proposed to solve the problem of scheduling computing resources based on the development and study of polynomial scheduling algorithms for arrays of hyperbolic applications. The main theoretical accuracy of this study is the creation of a formal scheduling apparatus, including the definition of resource sugar, as a model of user applications, based on the performance of an operation in the scheduling environment on a set of resource muscles. The scientific novelty of the research lies in the development of a central-ring polynomial algorithm for the distribution of computational time resources in grid systems, which involves an automatic scheduling algorithm for computing systems, adaptation to quadratic types of user applications and improves the efficiency of computational time resources distribution. To evaluate the developed efficiency of the software application algorithm and the conducted computational experiment with rapidly generated classes of computational resources. Obtained comparative results of the proposed algorithm practical efficiency experimental studies for the distribution of computational and time resources. The described studies have a high level of theoretical and practical significance and are directly related to the solution of artificial intelligence classical problems.

Dispatching; parallel computing; grid-computing; distributed computing resources; central-ring polynomial algorithm; centralized architecture.

Введение. В настоящее время проблема эффективного диспетчирования с оптимизацией распределения используемых вычислительных ресурсов до конца не решена. Не предложен формальный аппарат среды диспетчирования, который позволит выявить закономерности распределения ресурсов, провести их классификацию и предложить эффективные методы решения данных задач, обеспечивающие параллелизм выполнения и оптимальное использование вычислительных ресурсов. Особенно это актуально для решения проблем диспетчирования грид-систем с централизованной архитектурой, которая использует технологию мульти-сайтного выполнения задач. В этом случае распределение ресурсов происходит одновременно для нескольких сайтов, что выходит за рамки параллельных систем. Применение данной архитектуры требует разработки эвристических алгоритмов распределения вычислительных ресурсов с функцией учета свойств массивов заявок пользователей и оценки соответствия расписания.

От эффективности метода распределения вычислительных ресурсов зависит надежность и быстродействие всей грид-системы в целом. Например, неоптимальное распределение вычислительных ресурсов всегда влечет за собой риск выхода информационного процесса из активной фазы вычислений и перевода в состояние ожидания на неопределенное время. Такое событие, называемое «отстранением», является следствием возникновения ошибок в оперативном диспетчировании распределенных вычислительных ресурсов [1–7]. Исключение возникновения подобных ошибок требует разработки формального аппарата среды диспетчирования, который будет выявлять закономерности множества заявок, введет их типизацию и построит эвристические алгоритмы с оценкой качества, адаптированные под соответствующие типы. Разработка такого формального аппарата несомненно является актуальной задачей. Не менее важной задачей в рамках создания данного аппарата является построение модели паритетности ресурсов и моделей взаимодействия пользователей и вычислительной системы.

Авторами предложено решать задачу диспетчирования вычислительных ресурсов на основе разработки и исследования полиномиальных алгоритмов диспетчирования массивами заявок гиперболического типа. Основной теоретической значимостью данного исследования является создание формального аппарата среды диспетчирования, включающего определение ресурсного прямоугольника, как модели заявки пользователя, на основе выполнения операций в среде диспетчирования над этими ресурсными прямоугольниками.

Научная новизна исследования заключается в разработке центрально-кольцевого полиномиального алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов в грид-системах, который отличаются от существующих алгоритмов диспетчирования вычислительных систем адаптацией к квадратичным типам заявок пользователей и позволяет повысить эффективность распределения вычислительно-временных ресурсов.

Сложность задачи сбалансированного управления ресурсами в Grid- системах растет пропорционально росту числа процессоров и увеличению быстродействия информационных сетей. Равноправность используемых вычислительных ресурсов требует применения принципа паритетности. В данной работе для Grid- систем с централизованной структурой системы диспетчирования и ко-аллокацией ресурсов (мульти-сайтное диспетчирование) использована паритетная модель ресурсного квадранта [8–15].

Основу формального аппарата проведенного исследования составляет центрально-кольцевой полиномиальный алгоритм распределения вычислительно-временных ресурсов. Для оценки эффективности предложенного алгоритма разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент с раз-

ным количеством сформированных классов вычислительных ресурсов. Полученные сравнительные результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждает эффективность предложенного алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов.

1. Постановка задачи. Для формализованного представления заявки авторы применили понятие «ресурсного прямоугольника». *Ресурсным прямоугольником* является фигура (рис. 1), у которой горизонтальное и вертикальное измерения считаются равными числу единиц ресурса времени и процессоров соответственно, требуемому для обработки заявки. Символом $a(j_1) \times b(j_1)$ или $[(a(j_1), b(j_1))]$ обозначим j_1 -ю заявку, требующую $a(j_1)$ единиц времени и $b(j_1)$ единиц процессоров.

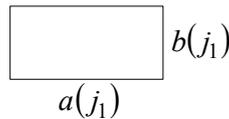


Рис. 1. Ресурсный прямоугольник

Несмотря на визуальное сходство ресурсного прямоугольника с геометрическим, на самом деле они принципиально отличаются. Звенья-измерения геометрического прямоугольника имеют размерность единиц длины, одного рода – однородны. В тоже время звенья-измерения ресурсного прямоугольника имеют размерность единиц ресурса одного рода (процессоры) и другого рода (время) – разнородны.

Зададим отличие ресурсных звеньев-измерений от геометрических величин, введем символику унодных импульсов 1-го, 2-го рода

$$a(j_1) \rightarrow a(j_1) \delta_{j_1}^{(1)}(j_1), \quad b(j_1) \rightarrow b(j_1) \delta_{j_2}^{(2)}(j_2),$$

с коэффициентами гомотетии $a(j_1)$, $b(j_1)$ в качестве упомянутых звеньев. Здесь

$$\delta_{j_1}^{(1)}(j_1) = \begin{cases} 1, & j_1 = j_1, \\ 0, & j_1 \neq j_1, \end{cases} \quad \delta_{j_2}^{(2)}(j_2) = \begin{cases} 1, & j_2 = j_2, \\ 0, & j_2 \neq j_2. \end{cases}$$

Представим базовую модель Z^1 – среды диспетчирования на основе применения полосы граней (рис. 2) единичной высоты и оснований-звеньев-измерений 1-го рода $a(j_1) \delta_{j_1}^{(1)}(j_1) \times 1$.

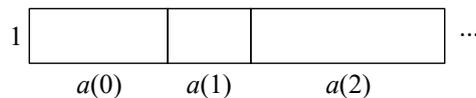


Рис. 2. Линейная полиэдраль граней единичной высоты

При убывании звеньев-измерений оснований $a(j_1) \downarrow, j_1 \uparrow$ применяется алгебраизация Z^1 – кругового квадратичного типа с Z -разностью $\Delta_1 = S_1 - 1$, где S_1 – единичный сдвиг $S_1 Y(j_1) = Y(j_1 + 1)$ и круговые унодные импульсы $\delta_{j_1}^{(1)}(j_1)$ с гармоническим изображением $W_1^{j_1}, W_1 = \exp(i \frac{2\pi}{k})$.

При возрастании звеньев-измерений оснований $a(j_1) \uparrow, j_1 \uparrow$ применяется алгебраизация Z_{co}^1 – гиперболического квадратичного типа с Z_{co} – разностью $\Delta_{co} = S_1 + 1$ и гиперболические унодные импульсы $(-1)^k \delta_{j_1}^{(1)}(j_1)$ с гармоническим изображением $(-W_1)^k$.

В итоге, Z^1 – среда элементов диспетчирования образована гранями единичной высоты $a(j_i) \times 1$ и гранями единичных оснований $1 \times b(j_i)$ с указанными выше действиями над ними и метрированием Z -интегралами Z^1 , Z_{co}^1 , Z_{pa}^1 – алгебраизаций. На этой основе возникает линейная полиэдраль граней $a(j_i) \times b(j_i)$ в качестве основной модели Z^2 – среды диспетчирования (рис. 3).

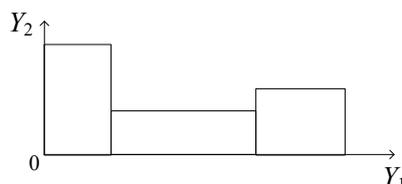


Рис. 3. Линейная полиэдраль ресурсов прямоугольников

Мера ресурсного прямоугольника $a(j_i) \times b(j_i)$ определена величиной $\frac{1}{2} \left[\frac{a(j_i)b(j_i) + (b(j_i) - a(j_i))^2}{a(j_i)b(j_i)} \right] = \frac{1}{2} + \frac{(b(j_i) - a(j_i))^2}{2a(j_i)b(j_i)}$, называемой эвристической мерой, состоящей из площади $a(j_i) \cdot b(j_i)$ и показателя асимметрии прямоугольника $(b(j_i) - a(j_i))^2$, учитывающего его форму [16].

Также были определены базовые операции сложения, умножения, дифференцирования и динамического интегрирования ресурсных прямоугольников, ориентированные на диспетчирование множественного компьютерного обслуживания [16].

Для задания гиперболического типа линейных полиэдралей был введен признак попарной последовательной несравнимости ресурсных прямоугольников $\Delta_1 \cdot \Delta_2 < 0$ и реализована возможность упорядочивания граней по убыванию высот и росту оснований с возрастанием индексации, $j_i \uparrow$, определяющим свойством гиперболической типизации линейной полиэдрали.

В число важных факторов гиперболической квадратичной типизации, наряду с центральным признаком несравнимости ресурсных прямоугольников массива гиперболического типа, входит антисогласованность изменения измерений граней с изменением индексации граней.

Приведём базовые примеры массивов заявок гиперболического типа: ресурсных прямоугольников $(k + j_i) \times (3k - j_i)$, $j_i = \frac{k}{2} + 1, \frac{k}{2} + 2, \dots, \frac{k}{2} + k$ (рис. 4), ресурсных прямоугольников горизонтальной формы $(k + j_i) \times (3k - j_i)$, $j_i = k, k + 1, \dots, k + (k - 1)$ (преимущественные требования временного ресурса $a(j_i) > b(j_i)$) (рис. 5), ресурсных прямоугольников вертикальной формы $(k + j_i) \times (3k - j_i)$, $j_i = 1, 2, \dots, k$ (преимущественные требования процессорного ресурса $a(j_i) < b(j_i)$) (рис. 6).

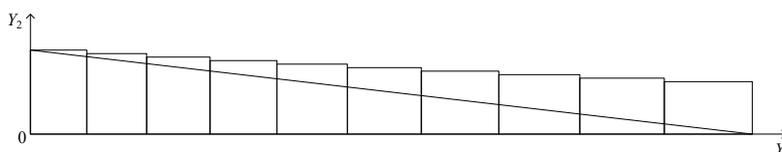


Рис. 4. Гиперболическая полиэдраль ресурсов прямоугольников

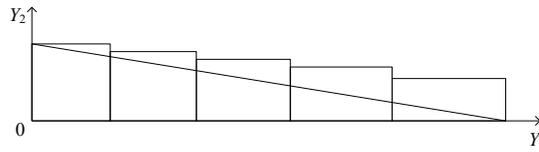


Рис. 5. Гиперболическая полиэдраль прямоугольников горизонтальной формы

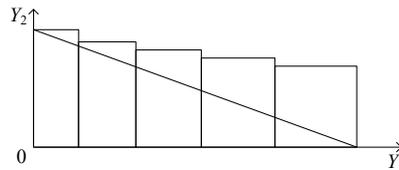


Рис. 6. Гиперболическая полиэдраль прямоугольников вертикальной формы

Пара ресурсных прямоугольников, упорядоченных по убыванию высот, относится к параболическому типу в случае превалирования хорды над левым отсчётом второй грани. Иначе, при превалировании левого отсчёта второй грани над хордой, пара ресурсных прямоугольников относится к круговому или гиперболическому типу в случае сравнимости или несравнимости соответственно. Таким образом, формируется основа для общего алгоритма факторизации линейной полиэдры на модули определённой квадратичной типизации.

2. Разработка и исследование центрально-кольцевого алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов в грид-системах. Опишем разработку центрально-кольцевого алгоритма диспетчирования линейными гиперболическими полиэдрами ресурсных прямоугольников $\bigcup_{j_1=0}^{k-1} [a(j_1), b(j_1)]$, $b(j_1) \downarrow$, $a(j_1) \uparrow$, $j_1 \uparrow$ [17–24].

В данном представлении модели диспетчирования начально-кольцевая локализация трансформируется в центрально-кольцевую. При этом, роль максимального начального ресурсного элемента линейной круговой полиэдры переходит к центральному элементу $[(a(j_1^*), b(j_1^*))]$ минимальной асимметрии измерений $|b(j_1^*) - a(j_1^*)| = \min_{j_1} |b(j_1) - a(j_1)|$. Данный ресурсный элемент делит массив на предшествующие элементы с номерами $j_1 < j_1^*$ больших высот и меньших оснований и последующие элементы с $j_1 > j_1^*$ противоположного свойства. Представим последовательность шагов алгоритма:

1⁰. Центральный ресурсный элемент зададим в качестве начальной оболочки (рис. 7).

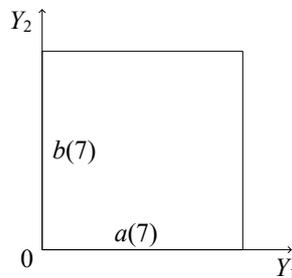


Рис. 7. Начальная ресурсная оболочка

2⁰. На втором шаге вдоль правой стороны оболочки $Y_1 = a(j_1^*)$ вертикально позиционируем последующие по отношению к центральному ресурсные прямоугольники $\bigcup_{i=j_1^*+1}^{j_1^*+q_1} [(a(j_i), b(j_i))]$ до наибольшего приближения уровня оболочки с недостатком $\sum_{i=j_1^*+1}^{j_1^*+q_1} b(j_i) = b(j_1^*) - 0$ (операция динамического интегрирования ресурсных прямоугольников по вертикали). Здесь q_1 – число ресурсных прямоугольников, после операции суперпозиции в вертикальном слое. Далее построим новую ресурсную оболочку полученной совокупности ресурсных прямоугольников (рис. 8).

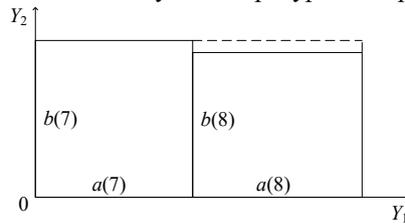


Рис. 8. Первая ресурсная оболочка

3⁰. Над верхней стороной достигнутой оболочки вдоль горизонтального отрезка на упомянутом уровне $Y_2 = b(j_1^*)$ проведем последовательную суперпозицию элементов, предшествующих центральному $\bigcup_{i=j_1^*-1}^{j_1^*-q_2} [(a(j_i), b(j_i))]$, до получения наибольшего приближения с недостатком величины протяжённости оболочки $\sum_{i=j_1^*-1}^{j_1^*-q_2} a(j_i) = a(j_1^*) + a(j_1^* + q_1) - 0$ (операция динамического интегрирования ресурсных прямоугольников по горизонтали). Здесь q_2 – число ресурсных прямоугольников, над которыми проведена операция суперпозиции в горизонтальном слое. Далее построим новую ресурсную оболочку полученной совокупности ресурсных прямоугольников (рис. 9).

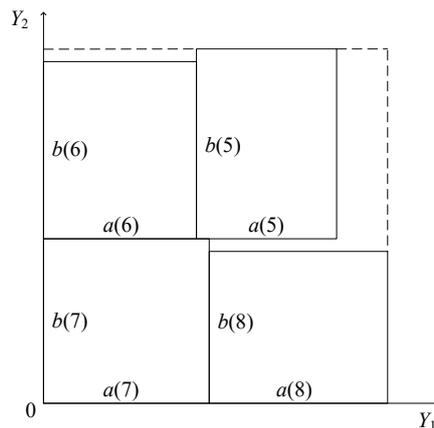


Рис. 9. Вторая ресурсная оболочка

4⁰. На данном шаге алгоритма повторно вдоль правой стороны достигнутой оболочки $Y_1 = a(j_1^*) + a(j_1^* + q_1)$ вертикально проводится операция суперпозиции последующих ресурсных прямоугольников $\bigcup_{j_1=j_1^*+q_1+1}^{j_1^*+q_1+q_3} [(a(j_1), b(j_1))]$ до достижения наибольшего приближения уровня оболочки с недостатком $\sum_{j_1=j_1^*+q_1+1}^{j_1^*+q_1+q_3} b(j_1) = b(j_1^*) + b(j_1^* - q_2) - 0$ (операция динамического интегрирования ресурсных прямоугольников по вертикали). В данном случае q_3 – число ресурсных прямоугольников, над которыми проведена операция суперпозиции в вертикальном слое. Далее построим новую ресурсную оболочку (рис. 10).

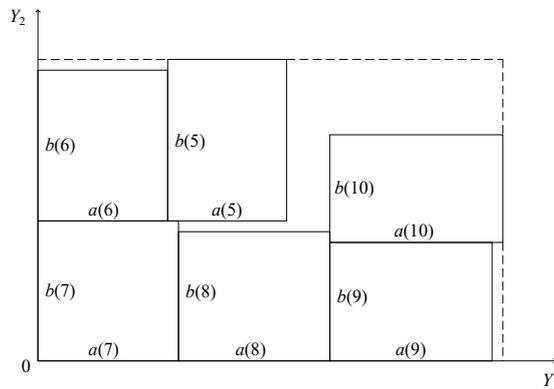


Рис. 10. Третья ресурсная оболочка

5⁰. На следующем шаге алгоритма над верхней стороной достигнутой оболочки вдоль горизонтали $Y_2 = b(j_1^*) + b(j_1^* - q_2)$ проводим последовательную суперпозицию элементов, предшествующих по отношению к центральному $\bigcup_{j_1=j_1^*-q_2-1}^{j_1^*-q_2-q_4} [(a(j_1), b(j_1))]$, до достижения наибольшего приближения с недостатком вели-

чины протяжённости оболочки $\sum_{j_1=j_1^*-q_2-1}^{j_1^*-q_2-q_4} a(j_1) = a(j_1^*) + a(j_1^* + q_1) + a(j_1^* + q_1 + q_3) - 0$

(операция динамического интегрирования ресурсных прямоугольников по горизонтали). В этом случае q_4 – число ресурсных прямоугольников, над которыми проведена операция суперпозиции в горизонтальном слое.

6⁰. В следующих итерациях повторяем разработанный алгоритм центрально-кольцевой локализации до достижения полного исчерпания ресурсных прямоугольников массива (рис. 11).

Количество итераций работы центрально-кольцевого алгоритма составляет k операций сложения и k операций сравнения. Таким образом, алгоритм является полиномиальным.

Отметим, что для линейной полиэдральной гиперболических ресурсных прямоугольников с центральным элементом минимальной асимметрии $(k + j_1) \times (3k - j_1)$, $j_1 = \frac{k}{2} + 1, \frac{k}{2} + 2, \dots, \frac{k}{2} + k$ при $k = 20$ соответствующие построения показаны на рис. 12.

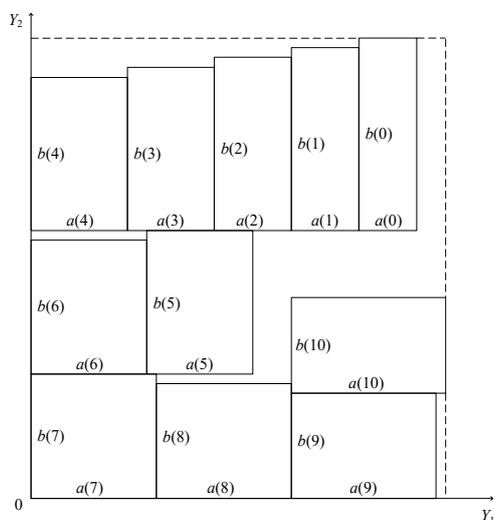


Рис. 11. Конечная ресурсная оболочка

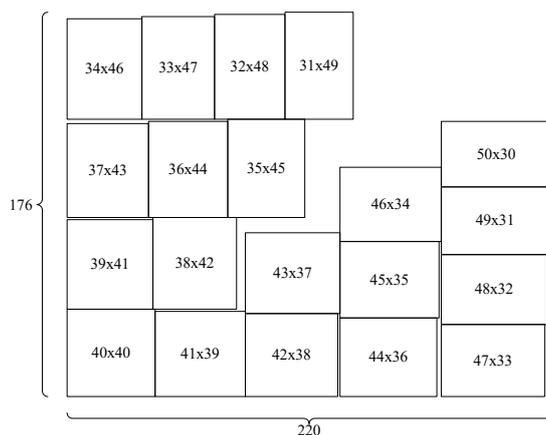


Рис. 11. Укладка гиперболической линейной полиэдрали ресурсных прямоугольников центрально-кольцевым алгоритмом

Эвристические меры ресурсных оболочек центрально-кольцевого алгоритма для этой последовательности гиперболических ресурсных прямоугольников с центральным элементом минимальной асимметрии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Эвристические меры ресурсных оболочек центрально-кольцевого алгоритма

k	Ресурсная оболочка	Эвристическая мера	k	Ресурсная оболочка	Эвристическая мера
10	89×66	0,82	16	178×142	0,83
11	97×73	0,73	17	188×151	0,77
12	106×79	0,67	18	199×159	0,73
13	114×117	0,78	19	209×168	0,68
14	123×125	0,72	20	220×176	0,65
15	167×134	0,89			

Проведенные экспериментальные исследования показали, что эвристические меры ресурсных оболочек центрально-кольцевого алгоритма не превосходят значения $\frac{1}{2} + 0,39$.

Таким образом, в представленной работе описаны разработка и исследование эвристического центрально-кольцевого алгоритма диспетчирования массивами заявок гиперболического типа. Подтверждена полиномиальная трудоёмкость предложенного центрально-кольцевого алгоритма. Для базового примера массива заявок гиперболического типа ресурсных прямоугольников $(k + j_1) \times (3k - j_1)$, $j_1 = \frac{k}{2} + 1, \frac{k}{2} + 2, \dots, \frac{k}{2} + k$ строятся объемлющие прямоугольники с вычислением эвристических мер. Сделан вывод о высоком качестве получаемых решений на основе применения данного эвристического полиномиального центрально-кольцевого алгоритма.

Заключение. В данной статье представлена разработка центрально-кольцевого полиномиального алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов в грид-системах, который отличается от существующих алгоритмов диспетчирования вычислительных систем адаптацией к квадратичным типам заявок пользователей, что позволяет повысить эффективность распределения вычислительно-временных ресурсов.

Актуальность задачи обоснована значительным ростом востребованности парадигмы распределенных вычислений в условиях информационного переполнения и неопределенности. В статье рассмотрены проблемы диспетчирования гетерогенных вычислительных ресурсов при решении сложных профессиональных и научных задач, поступающих в различные моменты времени, на основе классификации по значимым признакам соответствия и готовности ресурса. Проведен сравнительный обзор существующих аналогов. Сформулирована постановка решаемой задачи в контексте выбранной тематики исследования. Обоснована проблема диспетчирования грид-систем с централизованной архитектурой, которая использует технологию мульти-сайтного выполнения задач.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент с разным количеством сформированных классов вычислительных ресурсов. Полученные сравнительные результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждает эффективность предложенного алгоритма распределения вычислительно-временных ресурсов. Временная сложность представленного алгоритма является полиномиальной.

Полученные количественные оценки демонстрируют экономию времени при решении задач диспетчирования распределенных вычислительных ресурсов. Статистика сравнения выявила преимущества разработанного полиномиального алгоритма при учёте качества заполнения ресурсной оболочки. Описанные исследования имеют высокий уровень теоретической и практической значимости и напрямую связаны с решением классических задач искусственного интеллекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Magoulès F., Nguyen T., Yu L.* Grid resource management: toward virtual and services compliant grid computing, Numerical analysis and scientific computing. CRC Press, UK, 2009.
2. *Magoulès F.* ed. Fundamentals of grid computing: theory, algorithms and technologies, Numerical analysis and scientific computing. CRC Press, UK, 2010.
3. *Patel S.* Survey Report of Job Scheduler on Grids, *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 2013, 2 (4), pp. 115-125.

4. Li M., Baker M. The grid: core technologies. John Wiley & Sons Ltd, England. 2005.
5. Saak A.E., Kureichik V.V., Kravchenko Y.A. Scheduling quality of precise form sets which consist of tasks of circular type in GRID systems, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1015 (4).
6. Saak A.E., Kureichik V.V., Lezhebokov A.A. Scheduling of parabolic-type tasks arrays in GRID systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, pp. 292-298.
7. Saak A., Kureichik, V., Kravchenko Y. To scheduling quality of sets of precise form which consist of tasks of circular and hyperbolic type in grid systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, pp. 157-166.
8. Saak A.E., Kureichik V.V., Kuliev E.V. Ring algorithms for scheduling in grid systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, pp. 201-209.
9. Wäscher G., Haußner H., Schumann H.. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 183, pp. 1109-1130.
10. Huang E., Korf R. Optimal rectangle packing: an absolute placement approach. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2012, Vol. 46, pp. 47-87.
11. Simonis H., O'Sullivan B. Search strategies for rectangle packing. In Stuckey, P. (ed.), *14th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2008)*, Vol. 5202 of Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2008, pp. 52-66.
12. Clautiaux F., Carlie, J., Moukrim A. A new exact method for the two-dimensional orthogonal packing problem, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 183 (3), pp. 1196-1211.
13. Bastos-Filho C.J.A., Lima-Neto F.B., Lins Sousa M.F.C., Pontes M.R. On the influence of the swimming operators in the fish school search algorithm, *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, 2009 pp. 5012-5017.
14. Kenmochi M., Imamichi T., Nonobe K., Yagiura M., Nagamochi H. Exact algorithms for the two-dimensional strip packing problem. *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 198, pp. 73-83.
15. Moffitt M., Pollack M. Optimal rectangle packing: a meta-csp approach. In Long, D., Smith, S., Borrajo, D., McCluskey, L. (ed.), *ICAPS*, 2006, pp. 93-102. AAAI.
16. Hifi M., Ouafi R. A best-first branch-and-bound algorithm for orthogonal rectangular packing problems. *Int. Trans. in Operational Research*, 1998, No. 5 (5), pp. 345-356.
17. Foster I., Kesselman C. The Grid in a nutshell. In: Nabrzyski, J., Schopf, J., Weglarz, J. (ed.) *Grid Resource Management: state of the art and future trends*. Kluwer, 2003.
18. Kureychik V.M. Overview and problem state of ontology models development, *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2015 - Proceedings 9*, 2015, pp. 558-564.
19. Semenova A.V. and Kureychik V.M. Application of swarm intelligence for domain ontology alignment, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'16)*, 2016, Vol. 1, pp.261-270.
20. Bova V., Kureichik V. and Zaruba D. Heuristic approach to model of corporate knowledge construction in information and analytical systems, *2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Baku, 2016*, pp. 1-5.
21. Kureichik V., Zaporozhets D., and Zaruba D. Generation of bioinspired search procedures for optimization problems, *Application of Information and Communication Technologies, AICT 2016 - Conference Proceedings*, 2016, Vol. 10.
22. Pulyavina N., Taratukhin V. The Future of Project-Based Learning for Engineering and Management Students: Towards an Advanced Design Thinking Approach, *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceeding*, 2018, No. 125.
23. Becker J. Next-Gen Design Thinking. Using Project-Based and Game-Oriented Approaches to Support Creativity and Innovation, *J. Becker, N. Pulyavina, V. Taratukhin // Proceedings of the 1st International Conference of Information Systems and Design*, 2020.
24. Bova V.V., Nuzhnov E.V., Kureichik V.V. The combined method of semantic similarity estimation of problem oriented knowledge on the basis of evolutionary procedures, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 573, pp. 74-83.

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

Кравченко Даниил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: kravchenkodanil122@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; студент.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Кулиев Эльмар Валерьевич – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Саак Андрей Эрнестович – e-mail: aesaak@sfedu.ru; тел.: 88634393373; кафедра государственного и муниципального управления; зав. кафедрой.

Kravchenko Daniil Yurievich – Southern Federal University; e-mail: kravchenkodanil122@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; student.

Kravchenko Yury Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

Kuliev Elmar Valerievich – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

Saak Andrey Ernestovich – e-mail: aesaak@sfedu.ru; phone: +78634393-373; the department of state and municipal management, head of department.

УДК 621.397.13:629.584

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-158-170

Н.А. Будко, А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев

ВЫЧИТАНИЕ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В МУТНОЙ ВОДЕ

Исследование морских глубин в целях обеспечения безопасности, эффективного использования подводных ресурсов является актуальной задачей. В первой части статьи кратко рассмотрены физические феномены и ограничения, возникающие при распространении электромагнитных волн видимого диапазона в подводной среде. Показано, что системы подводного видения (как класс специализированных систем технического зрения, - СТЗ) на основе обычных ПЗС матриц сталкиваются с рядом фундаментальных ограничений в вопросе повышения эффективности функционирования в природной воде низкой прозрачности. В частности, использование искусственных источников освещения в составе систем подводного видения в мутной воде приводит к возникновению помехи обратного распространения (ПОР), приводящей к паразитной засветке матрицы оптического прибора. В качестве перспективного направления развития систем подводного видения предлагается использовать методы вычитания ПОР на основе информации о поляризации света. В обзорной части статьи рассмотрены последние достижения в данной области. В основной части статьи представлена методология исследования предлагаемого метода вычитания ПОР на основе сравнения с результатами, получаемыми при обработке изображений известными методами оценки параметров вектора Стокса DoLP и AoLP, позволяющими получать информацию о степени поляризации и преобладающих углах поляризации света соответственно. Представлены экспериментально полученные результаты обработки данных съемок подводной сцены в воде различной степени мутности посредством алгоритмов DoLP, AoLP и предлагаемым методом вычитания ПОР. Отличительными особенностями является использование при расчетах четырех, а не двух направлений поляризации, а также оригинальный математический аппарат обработки сигналов матрицы камеры машинного зрения.

Системы технического зрения; поляризация света; степень линейной поляризации; угол линейной поляризации; помеха обратного распространения.

N.A. Budko, A.Yu. Budko, M.Yu. Medvedev

**SUBTRACTION OF BACKPROPAGATION INTERFERENCE BASED
ON POLARIZATION IN UNDERWATER VISION SYSTEMS
FOR OPERATION IN TURBID WATER**

The study of the sea depths in order to ensure safety, the effective use of underwater resources is an urgent task. The first part of the article briefly considers the physical phenomena and limitations that arise during the propagation of electromagnetic waves in the visible range in the underwater environment. It is shown that underwater vision systems (as a class of specialized technical vision systems - TVS) based on conventional CCD matrices face a number of fundamental limitations in terms of improving the efficiency of functioning in natural water of low transparency. In particular, the use of artificial light sources as part of underwater vision systems in turbid water leads to the occurrence of backpropagation interference (BPR), which leads to spurious illumination of the optical device matrix. As a promising direction in the development of underwater vision systems, it is proposed to use methods for subtracting POR based on information about the polarization of light. In the review part of the article, the latest achievements in this field are considered. The main part of the article presents the methodology for studying the proposed method for subtracting the POR based on a comparison of the results obtained by processing images with known methods for estimating the Stokes vector parameters DoLP and AoLP, which allow obtaining information about the degree of polarization and the prevailing polarization angles of the scene, respectively. The experimentally obtained results of processing an underwater scene in water of varying degrees of turbidity using the DoLP, AoLP algorithms and the proposed methods for subtracting the POR are presented. Distinctive features are the use of four rather than two polarization directions in calculations, as well as the original mathematical apparatus for processing signals from the machine vision camera matrix.

Technical vision system; polarization of light; degree of linear polarization; angle of linear polarization; backpropagation interference.

Введение. Разработка систем подводного видения является на сегодняшний день актуальной задачей в силу возрастающего интереса к исследованию и освоению подводных пространств [1]. Информационные каналы, построенные на основе визуальных данных, позволяют получать объективные данные о подводной обстановке на различных глубинах погружения. При этом, спектр задач, решаемых системами подводного видения, включает следующие направления: научные исследования, народнохозяйственное и оборонное применения, выполнение поисковых и аварийно-спасательных операций (в т.ч. поиск утопающих) и т.д. [2–5]. В частности, могут быть выделены следующие задачи: осуществление локальной и глобальной навигации; обнаружение препятствий; обнаружение доковых станций и сопровождение процесса стыковки; геодезическая съемка рельефа морского дна; геологическая разведка на шельфе и в глубоководных районах Мирового океана; осмотр и обследование подводных конструкций и коммуникаций, установок нефте- и газодобывающего комплекса, нефтепроводов и газопроводов, кабельных трасс и т.п.

Проблемы подводного видения и постановка задачи. В качестве основных физических ограничений, обусловленных особенностями распространения световых волн ближнего инфракрасного и видимого диапазонов в природной водной среде, можно выделить следующие факторы:

- ♦ высокая плотность среды, обуславливающая сильное ослабление интенсивности световых волн (в 1000 раз и более по сравнению с воздухом в зависимости от условий) и ограничивающая максимальную дальность прямой видимости десятками метров;

- ◆ низкая естественная освещенность (в большинстве случаев), приводящая к необходимости использования дополнительных искусственных источников освещения;

- ◆ динамичная относительная прозрачность среды, обуславливающая высокое поглощение световых волн и изменение дальности прямой видимости в широком диапазоне;

- ◆ наличие в воде взвесей, обуславливающих повышенное рассеяние световых волн и помеху обратного рассеяния (ПОР) при использовании осветительных приборов в активных подводных СТЗ;

- ◆ эффекты рефракции световых волн, светопоглощение и светорассеяние.

Ослабление светового потока обусловлено двумя основными причинами: поглощением и рассеянием. Наибольшие затруднения при работе подводных СТЗ вызываются рассеянием. Рассеяние света в воде вызывается как присутствием в воде механических частиц, так и перемещениями молекул самой воды, но в мутной воде в большей степени зависит именно от загрязненности взвешенными частицами.

На практике прозрачность воды оценивают по глубине видимости белого диска диаметром 300 мм. Глубина видимости Z_D диска определяется как сумма результатов двух измерений (глубины исчезновения диска при погружении и глубины появления диска при его подъеме) деленная пополам.

В мутной воде и на больших глубинах используются активные системы подводного видения с прожекторами в своем составе [6]. Для нормального подводного видения важно соотношение количеств рассеянного и направленного света, поскольку существенная доля потока излучения рассеивается в заднюю полусферу относительно направления распространения. Рассеянный свет не может участвовать в образовании изображения, напротив, попадая через объектив на матрицу он вызывает ее паразитную засветку. При этом повышение силы источника света незначительно увеличивает дальность видимости, поскольку повышение мощности светового пучка приводит к увеличению ПОР, снижающей контрастность изображения. Кроме того, повышение силы света светильника в 10 раз увеличивает дальность видимости всего на 15%. Таким образом, возникающая в канале распространения ПОР создает значительные сложности при приеме слабого отраженного сигнала.

Наиболее простым способом борьбы с ПОР является разнесение излучателей световой энергии (прожекторов) и приемников [7, 8]. Однако из-за малых размеров подводных аппаратов данный способ недостаточно эффективен. При использовании прожекторной подсветки оператор способен рассмотреть объект подойдя к нему на расстояние не менее $0,7 \cdot Z_D$, а эффективный поиск целей на дальностях, превышающих порог $0,7 Z_D$ практически невозможен.

Таким образом, можно констатировать, что подводный видеосюжет представляет собой дифференциальный (разностный) сигнал – разность мощностей (энергий) оптического излучения, отраженного объектом интереса и фоном (ПОР). Чем меньше ПОР, тем более контрастным будет изображение подводных объектов, а, следовательно, и дальность их визуального наблюдения.

В связи с вышеописанными проблемами подводного видения можно выделить следующие перспективные направления развития таких систем:

- ◆ стробирующие лазерные телевизионные системы, позволяющие производить разделение сигналов ПОР и отраженного от объекта света во временной области;

- ◆ системы подводного видения с на основе поляризационных эффектов.

Целью данной работы является развитие методов на основе поляризационных эффектов для осуществления сепарации сигнала с матрицы фотоприемника от помехи обратного распространения, приводящее в конечном итоге к увеличению контрастности и дальности подводного видения.

Аналитический обзор. Свет, как и любое электромагнитное излучение, обладает четырьмя внутренними свойствами: интенсивностью, частотой, когерентностью и поляризацией. Информация о поляризации световых сигналов ранее получала сравнительно мало внимания со стороны научного сообщества и поэтому не использовалась в полной мере. В естественном мире поляризаторы есть повсюду, включая растительный и животный мир, твердые и жидкие поверхности, и прочее. Следовательно, состояние поляризации отраженного или проходящего света обычно включает в себя информацию о физическом состоянии объектов, с которыми он взаимодействовал, и, таким образом, потенциально может использоваться в анализе данных подводных съемок. Из-за ограниченного (до недавнего времени) количества поляриметрических датчиков и сложности проведения поляриметрических измерений, в настоящее время оптическое зондирование подводной среды в основном использует информацию об интенсивности, игнорируя поляриметрическую информацию. Тем не менее, как показывает ряд последних исследований, информация об оптической поляризации является полезной для решения многих проблем подводной съемки и в перспективе может помочь в достижении качественных прорывов в области подводного видения.

В качестве носителя информации, характеристики поляризованного света, такие как степень поляризации DoLP (degree of linear polarization, – степень линейной поляризации) и угол поляризации AoLP (angle of linear polarization – угол линейной поляризации), обладают большей надежностью, чем интенсивность света [9]. Более 70 подводных представителей животного мира [10] чувствительны к поляризации, а некоторые обладают способностью ориентироваться, охотиться, маскироваться и общаться с помощью поляризованного зрения [11–13].

Было обнаружено, что поляризация увеличивает контраст и дальность обнаружения в рассеивающих средах как над водой, так и под водой [14, 15], а технология бионической поляризационной навигации имеет потенциал для применения в воде [16].

В работе 2021 года исследователи разработали алгоритм, который автоматически находит оптимальные параметры для подавления рассеянного света [17]. Для испытаний в реальных условиях, исследователи создали простую установку для получения подводных изображений, используя светоизлучающий диод с длиной волны 625 нм в качестве источника света и пропуская свет через горизонтально-плоскостной поляризатор, рис. 1.

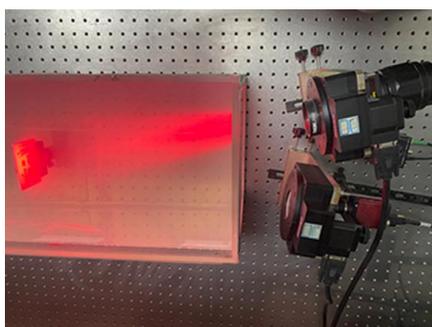


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования поляризованного изображения [17]

Плоско поляризованный свет попадал в прозрачный резервуар, содержащий объект изображения, погруженный в воду, с различным количеством молока, растворенного в воде для достижения различной степени мутности. Отраженный и

рассеянный свет от каждого эксперимента проходил обратно из резервуара и проходил через анализатор состояния поляризации, позволяя захватывать горизонтально и вертикально поляризованные изображения сцены с помощью камеры CCD, полученные изображения представлены на рис. 2.

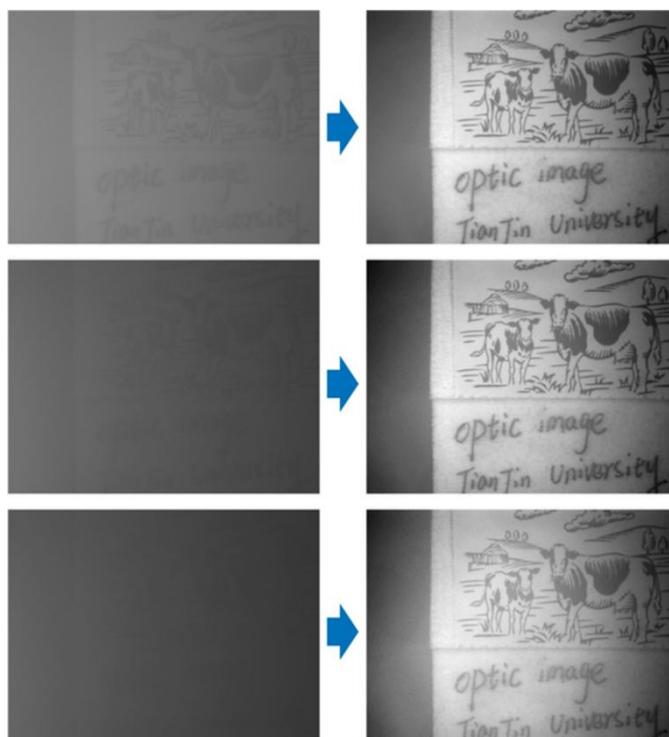


Рис. 2. Исходные изображения и результаты дифференцирования помехи обратного рассеяния [17]

В исследовании 2019 года авторами предложена модель подводной поляризационной визуализации, которая учитывает эффекты рассеяния и поглощения света в воде при естественном освещении [18]. Авторы исследовали информацию о поляризации целевой сцены, предполагая, что отраженный свет частично поляризован, а целевой свет неполяризован. Используется два поляризационных изображения целевой сцены в двух ортогональных состояниях поляризации. Отмечено, что целевой свет и обратно рассеянный свет различаются по поляризационному поведению. В частности, рассеянный свет частично поляризован, а отраженный целевой свет неполяризован из-за процесса деполяризации. Рассеяние света в работе оценивается по разности поляризации. А потеря энергии, вызванная поглощением, компенсируется за счет изучения информации о расстоянии целевой сцены (карты глубины), полученной из поляризационных изображений на основе модели Ламберта.

В работе [19] рассмотрена работа подводной СТЗ при пассивном (естественном) освещении, исходящем от солнечного света или облачного неба. Основа предложенного метода улучшения видимости заключается в том, что однократное рассеяние на мелких частицах вносит значительную поляризацию в свет при углах рассеяния около 90 градусов: этот свет затем можно отличить от света, рассеянного объектом, который остается почти полностью неполяризованным.

В исследовании 2021 года, рассмотрены вопросы улучшения видимости подводных изображений на основе технологии активного поляризованного освещения и фильтрации по математическому ожиданию [20]. Предложенный метод может напрямую удалить часть обратного рассеяния с помощью технологии поляризации, а затем решить проблему устранения дымки изображения с помощью алгоритма обработки изображений. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

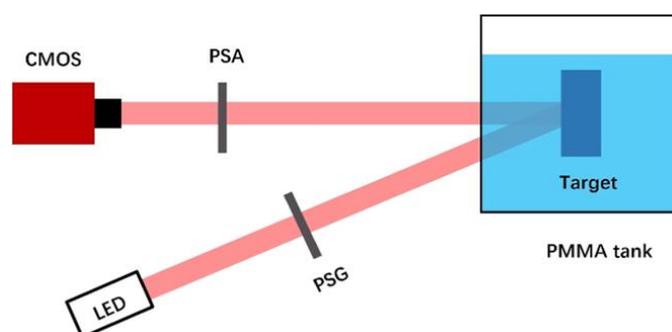


Рис. 3. Схема лабораторного стенда [20]

На рис. 3 источник света из белых светодиодов освещает цель. Система формирования изображения представляет собой 12-битный цифровой CMOS-датчик (MC023CG-SY-FL) с разрешением 1936×1216 пикселей. Поляризаторы помещаются перед источником света и CMOS матрицей соответственно. В процессе эксперимента использовалась прозрачная емкость, наполненная водой, смешанной с обезжиренным молоком, чтобы вода стала мутной.

На рис. 4 представлены результаты обработки с использованием физического поляризатора и последующей цифровой обработки.

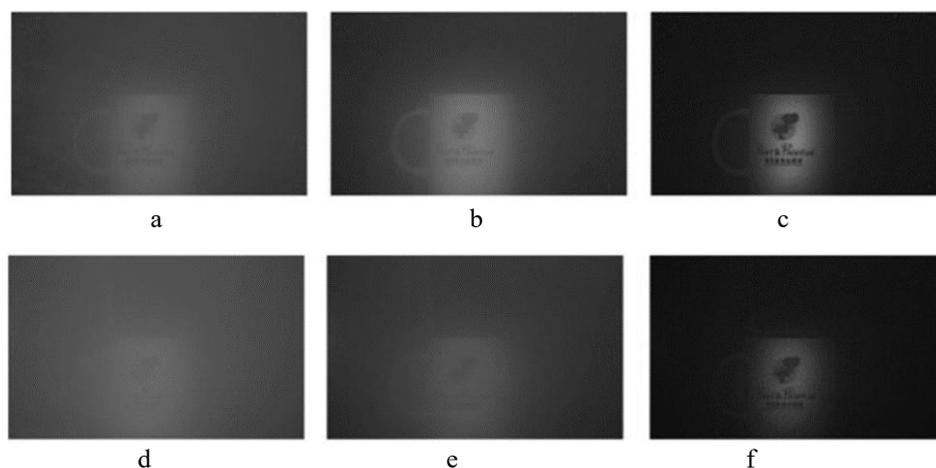


Рис. 4. Изображение стакана в оттенках серого, где верхний ряд представляет собой изображение, полученное в условиях низкой мутности, а нижний ряд – изображение, полученное в условиях высокой мутности: a и d – изображения, полученные непосредственно без поляризатора; b и e – изображения, полученные в поперечно-перпендикулярном состоянии поляризатора; c и f – изображения, полученные в перекрестно-перпендикулярное состояние поляризатора, а затем восстановленные цифровым методом удаления дымки [20]

Таким образом, методы поляризационной съемки позволяют улучшить качество изображения и характеристики СТЗ путем предоставления дополнительной информации о поляризации световых волн.

Методология. Исследование основано на сравнении предлагаемого метода вычитания ПОР с результатами стандартных методов оценки параметров вектора Стокса: DoLP и AoLP. DoLP – это отношение поляризованной составляющей света к общей величине света, которое может варьироваться от 0 (полностью неполяризованный свет) до 100% (полностью поляризованный свет), AoLP несет информацию об угле поляризации.

Информация о поляризованном свете содержится в четырех компонентах уравнения вектора Стокса и в общем виде может быть записано как (1):

$$S = [I, Q, U, V]^T, \quad (1)$$

где I – общая интенсивность света, Q – доля линейной поляризации, параллельной плоскости отсчета, U – доля линейной поляризации под углом 45° по отношению к плоскости отсчета, V – доля правой круговой поляризации.

Состояние поляризации падающего света $S = [I, Q, U, V]^T$, которое изменяется поляризационной матрицей, можно выразить на основе матрицы Мюллера (2):

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 \varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где φ – угол между главной оптической осью и нулевой реперной линией, $S' = [I', Q', U', V']^T$ – состояние поляризации выходящего света.

Здесь важна первая строка матрицы Мюллера (2), потому что интенсивность света может быть получена непосредственно камерой:

$$I'(\varphi) = 1/2 * (I + Q * \cos 2\varphi + U * \sin 2\varphi). \quad (3)$$

Следовательно, если известны интенсивности выходящего света при трех различных значениях φ , можно вычислить значения I , Q и U падающего луча.

Обработка изображений произведена следующим способом.

На первом этапе производится сепарация полученного массива с сырыми данными «*image*» по каналам поляризационных фильтров: 0, 45, 90 и 135 градусов.

Далее производится расчет параметров вектора Стокса (1) на основе разделения по каналам поляризации (4):

$$\begin{aligned} S_0 &= ch_0 + ch_{90} \\ S_1 &= ch_0 - ch_{90} \\ S_2 &= ch_{45} - ch_{135} \end{aligned} \quad (4)$$

Для рассчитанных по выражениям на первом этапе параметров вектора Стокса $S_0 - S_2$ производится проверка условий поляризованности излучения (5):

$$\begin{aligned} polariz \quad 0.0 \leq S_0 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad 0.0 \leq S_0 \leq 2.0 \\ polariz \quad -1.0 \leq S_1 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad -1.0 \leq S_1 \leq 1.0 \\ polariz \quad -1.0 \leq S_2 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad -1.0 \leq S_2 \leq 1.0. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее посредством выражения (6) производится расчет углов линейной поляризации (AoLP) для каждого блока элементарных фильтров матрицы камеры машинного зрения, состоящего из 4 каналов:

$$AoLP = 0.5 * \text{arctan2}(S_2, S_1). \quad (6)$$

Затем производится расчет степени линейной поляризации (*DoLP*) для каждого блока элементарных фильтров матрицы камеры машинного зрения (7):

$$DoLP = \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right) / S_0. \quad (7)$$

Для вычета ПОР производится обработка изображений по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} reflect_1 &= \min(ch_{90}, ch_{45}) \\ reflect_2 &= \min(ch_0, ch_{135}) \\ reflect &= \min(reflect_1, reflect_2) \\ ch_{90_{anmin}} &= ch_{90} - reflect \\ ch_{45_{anmin}} &= ch_{45} - reflect \\ ch_{135_{anmin}} &= ch_{135} - reflect \\ ch_{0_{anmin}} &= ch_0 - reflect \\ result &= ch_{90_{anmin}} + ch_{45_{anmin}} + ch_{135_{anmin}} + ch_{0_{anmin}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее была произведена сравнительная оценка описанных выше алгоритмов обработки сигнала на основе лабораторного исследования.

Эксперимент. Макет поляризационной СТЗ построен на основе: камеры машинного зрения Mako G-508B POL с поляризационной маской; камеры Mako G-507C с RGB маской Байера для получения контрольных снимков; вычислителя Jetson NX NVIDIA. Поляризационная камера Mako G-508B POL оснащена 5,0-мегапиксельным CMOS-датчиком Sony Polarsens™ IMX250MZR, в котором используется технология четырехстороннего поляризационного фильтра, рис. 5. Поляризационный слой нанопроволоки на кристалле поддерживает четыре ориентации поляризационных фильтров (90°, 45°, 135° и 0°).

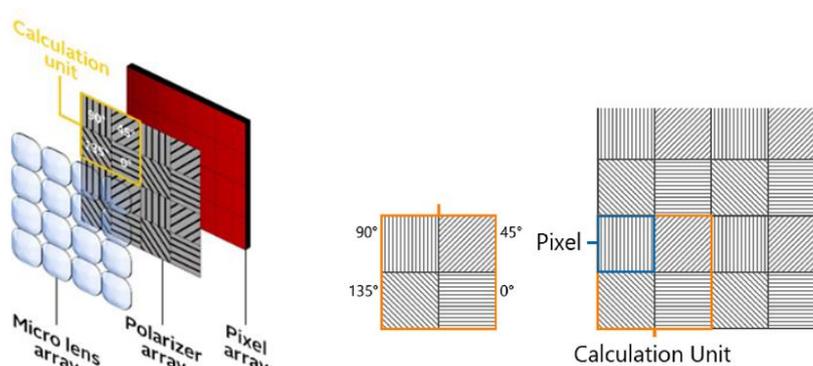


Рис. 5. Устройство матрицы Sony Polarsens™ IMX250MZR со встроенными поляризационными фильтрами

Четыре пикселя вместе составляют вычислительный блок для определения для каждого пикселя итогового изображения интенсивности и угла поляризации, аналогично RGB маске Байера. Датчик позволяет получать информацию о поляризации без дополнительных внешних фильтров.

В качестве объектива использован широкоугольный объектив Kowa LM16FC24M для матриц формата 1,1 дюйма, с максимальным диафрагменным числом 1,8 и фокусным расстоянием 16 мм.

Внешний вид макета СТЗ показан на рис. 6.

Вода объемом 47 литров была залита в емкость объемом 50 литров из стекла толщиной 4 мм. Прозрачность воды варьировалась от оптически чистой до прозрачности $Z_D=0.12$ метра посредством добавления пищевого красителя. Емкость с водой показана на рис. 7.



Рис. 6. Внешний вид разработанного макета СТЗ

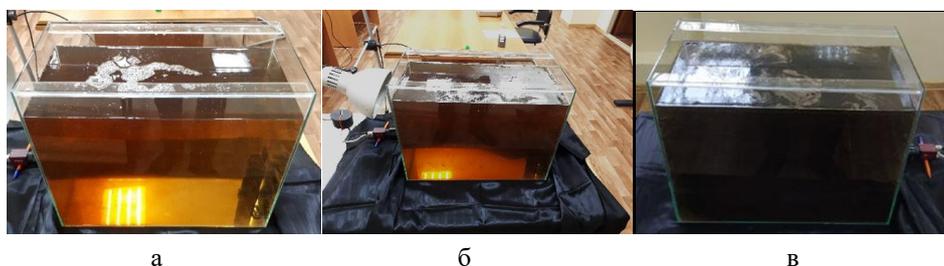
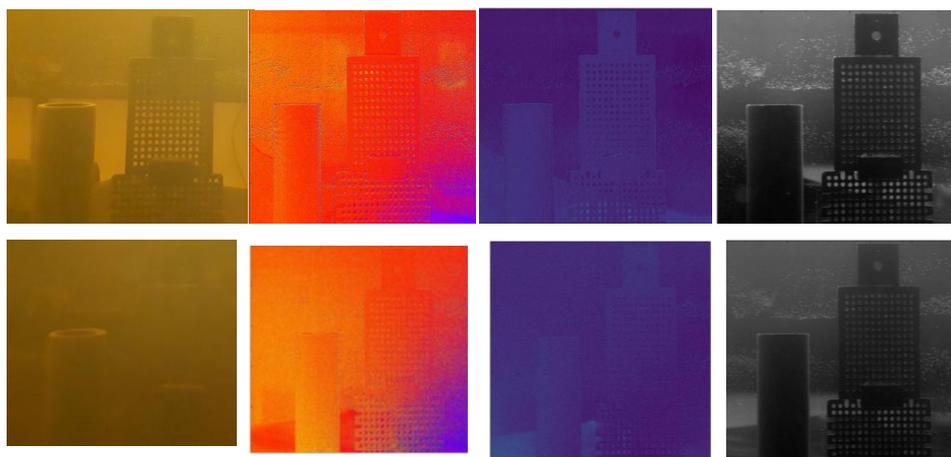


Рис. 7. Емкость с водой для моделирования мутной воды: а – прозрачность №1, б – прозрачность №2, в – прозрачность №5 ($Z_D=0,12$ м)

Далее объекты съемки были помещены в емкость с водой на максимальное удаление от камеры машинного зрения (0,48 м). Для каждой степени прозрачности произведен сбор данных в виде сырых (RAW) кадров с камеры машинного зрения. Результаты обработки данных для съемки подводных объектов показаны на рис.8., все изображения кроме контрольной группы (рис. 8,а) получены посредством обработки данных с камеры Мако G-508B POL с поляризационной маской.



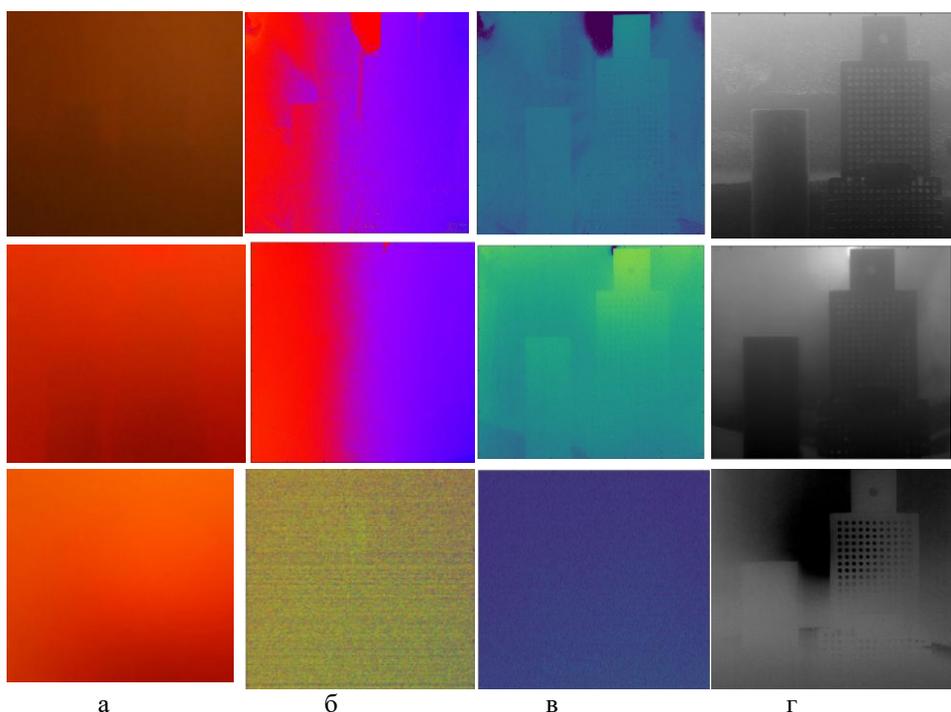


Рис. 8. Результаты обработки результатов съемки подводных объектов при пяти различных степенях прозрачности воды: а – контрольная съемка без обработки (камера Mako G-507C), б – степень поляризации DoLP, в – угол поляризации AoLP, г – изображения после вычета ПОР

Заключение. Анализ рис. 8 указывает на высокую эффективность предложенного способа вычитания ПОР на основе информации о поляризации по четырем осям и показывает существенное преимущество в сравнении с методами на основе анализа параметров вектора Стокса. Также следует отметить, что недостатком поляризационных матриц является существенно более низкая квантовая эффективность в рабочем диапазоне длин волн. Это обусловлено физикой работы поляризационного фильтра, который по своей природе снижает интенсивность проходящего светового потока минимум в два раза. Например, в аналогичных по характеристикам ПЗС матрицах Sony, отличающихся только маской фильтров, квантовая эффективность монохромной камеры составляет 64%, матрицы с RGB маской Байера 56%, матрицы с поляризационными фильтрами 25% по данным производителя. Очевидно, этот факт приводит к необходимости использования более длительных выдержек в подводных средах с низкой освещенностью. Этот недостаток наиболее существенен для систем подводного видения без искусственного источника света в своём составе. Однако, как показали представленные результаты исследования, при наличии искусственного источника света, возможность вычитания ПОР при использовании поляризационных матриц превалирует над более низкой квантовой эффективностью в контексте получения информации о сцене в мутной воде. Так, в результате эксперимента, в условиях минимальной прозрачности водной среды $Z_D=0,12\text{м}$, видимость сцены для камеры с маской Байера составила $0,8*Z_D$, в то время как при использовании метода вычитания ПОР из данных полученных с матрицы с поляризационными фильтрами удалось получить устойчивую визуализацию объектов съемки на расстоянии $3*Z_D$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рогов А.А.* Фотосъемка под водой. – М.: Наука, 1964.
2. *Войтов А.А., Сергеев В.В., Соколов В.А., Форсов Б.Ю.* Формирование изображений в активных системах подводного видения // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения». – 2015. – Вып. № 5. – С. 21-31.
3. *Сергеев В.В., Карнов В.В., Прибылов Ю.С., Соколов В.А.* Активная система подводного видения для автономных необитаемых подводных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения». – 2019. – Вып. 2. – С. 53-61.
4. *Сергеев С.В., Карнов В.Н., Прибылов Ю.С., Пшеничная О.К., Соколов В.А.* Адаптивная система фото и видео регистрации для автономных необитаемых подводных аппаратов // Neftegaz.RU. – 2020. – Вып. № 8.
5. *Артюхов М.Ю.* Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами // Тр. научно-технической конференции–семинара. – Вып. 4 / под ред. Р.Р. Назирова. – М., 2011. – С. 230-245.
6. *Liu H.X.* Research of Underwater Machine Vision for AUV Recycling Control. – 2009.
7. *Орлов В.М., Карасик В.Е.* Лазерные системы видения. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001.
8. *Мартынов В.Л., Краснопольский В.Е., Мальцев А.Б.* Строблирующие лазерные телевизионные системы для подводных аппаратов // Судостроение. – 2005. – № 4 (761). – С. 46-482.
9. *Hou W.A.* simple underwater imaging model // Optics Letters. – No. 34 (17). – P. 2688-2690.
10. *Horvath H.G., Varju D.* Polarized Light in Animal Vision. – 2004.
11. *Shashar N., Hagan R., Boal J.G., Hanlon R.T.* Cuttlefish use polarization sensitivity in predation on silvery fish // Vision Research. – 2000. – No. 40 (1). – P. 71-75.
12. *Waterman T.H.* Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals // Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society. – 2006. – No. (1). – P. 111-115.
13. *Cartron L., Josef N., Lerner A., Mccusker S.D., Darmaillacq A.S., Dickel L., Shashar N.* Polarization vision can improve object detection in turbid waters by cuttlefish // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2013. – No. 447 (3). – P. 80-85.
14. *Schechner Y.Y., Narasimhan S.G., Nayar S.K.* Polarization-based vision through haze // Applied Optics. – 2003. – No. 42 (3). – P. 511-525.
15. *Schechner Y.Y., Karpel N.* Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis // Journal of Oceanic Engineering. – 2005. – No. 30 (3). – P. 570-587.
16. *Cheng H.Y., Chu J.K., Zhang R., Tian L.B., Gui X.Y.* Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules // International Journal of Remote Sensing. – 2020. – No. 41 (13). – P. 4947-4962.
17. *Hongyuan W., Haofeng H., Junfeng J., Xiaobo L., Weihong Z., Zhenzhou C., Tiegen L.* Automatic underwater polarization imaging without background region or any prior // Optics Express. – 2021. – No. 29 (20). – P. 31283-31295.
18. *Fei L., Yi W., Pingli H., Kui Y., Lu B., Xiaopeng S.* Polarization-based exploration for clear underwater vision in natural illumination // Optics Express. – 2019. – No. 27 (3). – P. 3629-3641
19. *Chang P., Flitton J., Hopcraft K/, Jakeman E.* Improving Visibility Depth in Passive Underwater Imaging by Use of Polarization // Applied Optics. – 2003. – No. 42 (15). – P. 2794-2803.
20. *Tianci Li, Jianli Wang, Kainan Yao.* Visibility enhancement of underwater images based on active polarized illumination and average filtering technology // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – No. 61 (1). – P. 701-708.

REFERNCES

1. *Rogov A.A.* Fotos"emka pod vodoy [Photography under water]. Moscow: Nauka, 1964.
2. *Voytov A.A., Sergeev V.V., Sokolov V.A., Forsov B. Yu.* Formirovanie izobrazheniy v aktivnykh sistemakh podvodnogo videniya [Image formation in active underwater vision systems], *Voprosy radioelektroniki. Seriya «Tekhnika televideniya»* [Radio electronics issues. Series "Television technology"], 2015, Issue No. 5, pp. 21-31.

3. *Sergeev V.V., Karpov V.V., Pribylov Yu.S., Sokolov V.A.* Aktivnaya sistema podvodnogo videniya dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Active underwater vision system for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Voprosy radioelektroniki. Seriya "Tekhnika teledeniya"* [Radio electronics issues. Series "Television technology"], 2019, Issue 2, pp. 53-61.
4. *Sergeev S.V., Karpov V.N., Pribylov Yu.S., Pshenichnaya O.K., Sokolov V.A.* Adaptivnaya sistema foto i video registratsii dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Adaptive photo and video registration system for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Neftegaz.RU*, 2020, Issue No. 8.
5. *Artyukhov M.Yu.* Opyt sozdaniya sistemy lokal'noy videonavigatsii dlya podvodnykh apparatov. Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya mobil'nymi ob"ektami [Experience in creating a local video navigation system for underwater vehicles. Technical vision in mobile object management systems], *Tr. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii–seminara* [Proceedings of the scientific and technical conference–seminar]. Issue 4, ed. by R.R. Nazirova. Moscow, 2011, pp. 230-245.
6. *Liu H.X.* Research of Underwater Machine Vision for AUV Recycling Control, 2009.
7. *Orlov V.M., Karasik V.E.* Lazernye sistemy videniya [Laser vision systems]. Moscow: MGTU im. Bauman, 2001.
8. *Martynov V.L., Krasnopol'skiy V.E., Mal'tsev A.B.* Strobiruyushchie lazernye televizionnye sistemy dlya podvodnykh apparatov [Strobing laser television systems for underwater vehicles], *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2005, No. 4 (761), pp. 46-482.
9. *Hou W.A.* simple underwater imaging model, *Optics Letters*, No. 34 (17), pp. 2688-2690.
10. *Horvath H.G., Varju D.* Polarized Light in Animal Vision, 2004.
11. *Shashar N., Hagan R., Boal J.G., Hanlon R.T.* Cuttlefish use polarization sensitivity in predation on silvery fish, *Vision Research*, 2000, No. 40 (1), pp. 71-75.
12. *Waterman T.H.* Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, No. (1), pp. 111-115.
13. *Cartron L., Josef N., Lerner A., Mccusker S.D., Darmaillacq A.S., Dickel L., Shashar N.* Polarization vision can improve object detection in turbid waters by cuttlefish, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, No. 447 (3), pp. 80-85.
14. *Schechner Y.Y., Narasimhan S.G., Nayar S.K.* Polarization–based vision through haze, *Applied Optics*, 2003, No. 42 (3), pp. 511-525.
15. *Schechner Y.Y., Karpel N.* Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis, *Journal of Oceanic Engineering*, 2005, No. 30 (3), pp. 570-587.
16. *Cheng H.Y., Chu J.K., Zhang R., Tian L.B., Gui X.Y.* Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules, *International Journal of Remote Sensing*, 2020, No. 41 (13), pp. 4947-4962.
17. *Hongyuan W., Haofeng H., Junfeng J., Xiaobo L., Weihong Z., Zhenzhou C., Tiegen L.* Automatic underwater polarization imaging without background region or any prior, *Optics Express*, 2021, No. 29 (20), pp. 31283-31295.
18. *Fei L., Yi W., Pingli H., Kui Y., Lu B., Xiaoepeng S.* Polarization–based exploration for clear underwater vision in natural illumination, *Optics Express*, 2019, No. 27 (3), pp. 3629-3641
19. *Chang P., Flitton J., Hopcraft K/, Jakeman E.* Improving Visibility Depth in Passive Underwater Imaging by Use of Polarization, *Applied Optics*, 2003, No. 42 (15), pp. 2794-2803.
20. *Tianci Li, Jianli Wang, Kainan Yao.* Visibility enhancement of underwater images based on active polarized illumination and average filtering technology, *Alexandria Engineering Journal*, 2022, No. 61 (1), pp. 701-708.

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

Будко Наталья Александровна – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: natalia.tb13@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185670210; инженер; аспирант кафедры электротехники и мехатроники.

Будко Артём Юрьевич – e-mail: artem_budko@mail.com; тел.: +79281545833; с.н.с.; к.т.н.; доцент кафедры электротехники и мехатроники.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; тел.: +79198927349; в.н.с.; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой электротехники и мехатроники.

Budko Natalia Aleksandrovna – RDIRCS SFU; e-mail: natalia.tb13@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185670210; engineer; graduate student the department of electrical engineering and mechatronics.

Budko Artem Yurievich – e-mail: aptem_budko@mail.com; phone: +79281545833; senior research officer; cand. of eng. sc.; associate professor the department of electrical engineering and mechatronics.

Medvedev Mikhail Yurievich – e-mail: medvmihal@gmail.com; phone: +79198927349; leading researcher; dr. of eng. sc.; professor, head the department of electrical engineering and mechatronics.

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-170-192

**В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Д.О. Бросалин, М.А. Васильева,
Б.В. Гуренко, Н. Хамдан**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ
В ДВУМЕРНЫХ КАРТОГРАФИРОВАННЫХ СРЕДАХ***

Исследуются задача планирования движения в двумерных картографированных средах. Проводится обзор и анализ известных алгоритмов планирования, базирующихся на диаграммах Вороного, вероятностной дорожной карте, быстро растущих случайных деревьев, алгоритмах Дейкстры, A^ , D^* и их модификациях, искусственных потенциальных полях и интеллектуальных эвристиках. На основе проведенного анализа делается вывод о том, что классические методы в динамических средах требуют значительных затрат по времени расчетов и объему используемой памяти. Делается вывод об актуальности разработки алгоритмов, повышающих эффективность известных методов планирования. В этой связи данная статья посвящена разработке модифицированного алгоритма быстро растущих случайных деревьев и исследованию его эффективности по сравнению с известными методами. В статье представлен модифицированный алгоритм быстро растущих случайных деревьев, отличающийся тем, что при проверке наличия пути в новый потенциальный узел графа проверяется путь в некоторую область возле указанного узла. Это позволяет снизить количество узлов в строящемся дереве. Разработанный алгоритм вначале сравнивается с традиционным алгоритмом быстрорастущих случайных деревьев. Сравнение производится по времени расчета траектории, объему требуемой памяти, длине пути и проценту ситуаций, в которых успешно найдена траектория в целевую точку. Далее осуществляется сравнение разработанного алгоритма с алгоритмами планирования других классов. При исследовании используются репрезентативные выборки численных экспериментов и различные среды, отличающиеся плотностью расположения препятствий и наличием лабиринтов. Также проводится исследование алгоритмов планирования с использованием результатов экспериментов на наземном колесном роботе. По результатам численных и реальных экспериментов делаются выводы о преимуществах и недостатках разработанного алгоритма планирования движения и о целесообразности его применения в различных средах.*

Планирование движения; двумерная среда, метод случайных деревьев, оптимизация алгоритмов планирования, сравнительный анализ.

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

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, D.O. Brosalin, M.A. Vasileva, B.V. Gurenko,
N. Hamdan

STUDY OF PATH PLANNING METHODS IN TWO-DIMENSIONAL MAPPED ENVIRONMENTS

The article studies the problem of motion planning in two-dimensional mapped environments. The review and analysis of known planning algorithms based on Voronoi diagrams, probabilistic road maps, rapidly growing random trees, Dijkstra algorithms, A, D* and their modifications, artificial potential fields and intelligent heuristics are carried out. Based on the analysis, it is concluded that classical methods in dynamic environments require significant costs in terms of calculation time and the amount of memory used. The conclusion is made about the relevance of the development of algorithms that increase the efficiency of known planning methods. In this regard, this article is devoted to the development of a modified algorithm of rapidly growing random trees and the study of its effectiveness in comparison with known methods. The article presents a modified algorithm for rapidly growing random trees, characterized in that when checking for a path to a new potential node of the tree, the path to some area near the specified node is checked. This reduces the number of nodes in the tree under construction. The developed algorithm is first compared with the traditional algorithm of fast-growing random trees. The comparison is made by the trajectory calculation time, the amount of memory required, the path length and the percentage of situations in which the trajectory to the target point was successfully found. Next, the developed algorithm is compared with the planning algorithms of other classes. The study uses representative samples of numerical experiments and various environments that differ in the density of obstacles and the presence of mazes. A study of planning algorithms using the results of experiments on a ground-based wheeled robot is also being conducted. Based on the results of numerical and real experiments, conclusions are drawn about the advantages and disadvantages of the developed algorithm of motion planning and the feasibility of its application in various environments.*

Motion planning; two-dimensional environment, random tree method, optimization of planning algorithms, comparative analysis.

Введение. Развитие технологий позволяет повышать создавать робототехнические комплексы, способные функционировать при минимальном участии оператора. На сегодняшний день мобильные роботы подошли к уровню развития, который позволяет применять их автономно. В этой связи особую важность представляет задача оптимального планирования пути в реальном времени. Планирование пути – сложная и многогранная задача, которая не имеет универсального решения. В этой связи развитие и модификация различных алгоритмов, используемых при планировании пути, применимых и оптимальных для различных условий актуально.

В общем случае, задача планирования пути заключается в расчете последовательности состояний подвижного объекта, которые обеспечивают его перевод из текущего в целевое состояние. При этом под состоянием будем понимать минимально-необходимый набор значений переменных величин системы, способных однозначно и единственным образом определить положение системы в любой момент времени t [1].

Отметим, что переход из текущего в целевое состояние, обычно, можно осуществить множеством способов. В это связи предъявляются дополнительные требования к тому, как должен быть выполнен переход в целевое состояние. Как правило, предъявляются требования физической реализуемости и оптимальности траектории движения. К требованиям физической реализуемости относится, например, требование перехода в целевую точку за конечное время и при ограниченных управляющих воздействиях, требование отсутствия коллизий. Под оптимальностью траектории подразумевается минимизация или максимизация заданного критерия качества, например, времени движения, длины пути, затрачиваемой энергии и пр.

Таким образом, под алгоритмом планирования понимается набор правил, на основании которых для каждого момента планирования рассчитывается состояние, в которое должен перейти подвижный объект. В результате работы алгоритма планирования, на выходе, формируется набор состояний, который может быть преобразован в набор действий агента.

Согласно [2] планирование пути подвижного объекта в общем виде можно представить в виде последовательного выполнения действий, включающих расчет свободного от столкновений пути, сглаживание пути с учетом свойств объекта, расчет управляющих воздействий. Наиболее часто планирование пути осуществляется в конфигурационном пространстве [2]. Основным достоинством приведения задачи к виду конфигурационного пространства является то, что такой метод сводит задачу от вычислений для твердого тела к вычислениям для материальной точки, что значительно упрощает процесс [3].

В частности, для подвижного объекта в двумерном Евклидовом пространстве все конфигурации могут быть описаны вектором (x, y, φ) , в котором x, y – линейные координаты объекта, а φ – его угловая ориентация. Конфигурации пространства подразделяются на подмножества {«Свободное»}, {«Препятствия»} и {«Неопределенное»}.

Обзор методов планирования движения. В данной статье рассматриваются популярные алгоритмы планирования, которые можно разбить на четыре группы: а) методы, базирующиеся на применении теории графов (методы быстрорастущих случайных деревьев (RRT), вероятностных дорожных карт (PRM), диаграмм Вороного, диаграмм видимости); б) методы на основе клеточной декомпозиции (алгоритмы Дейкстры, A^* , D^*); в) методы на основе потенциальных полей (виртуальное силовое поле, метод Ньютоновских полей); методы на основе интеллектуальных технологий (нейронные сети, эволюционные вычисления, нечеткие вычисления). Рассмотрим более подробно некоторые алгоритмы из каждой группы.

Сегодня часто используются методы, основанные на клеточной декомпозиции, которые используют деление карты на ячейки. Это позволяет использовать дискретные итерационные алгоритмы построения пути. В случае представления конфигурационного пространства в виде решетки, популярными методами планирования является алгоритм Дейкстры и, базирующиеся на нем A^* и D^* [4 – 6].

Алгоритм A^* является развитием алгоритма Дейкстры. В A^* вычислительная сложность уменьшена за счет эвристической функции оценки стоимости пути. В то же время данный алгоритм требователен к объему используемой памяти, и его вычислительная сложность значительно растет с ростом числа ячеек на карте. В этой связи существует достаточно большое число модификация алгоритма A^* , которые нацелены на уменьшение указанных недостатков. К таким модификациям относятся A^* с итеративным углублением [7], A^* с ограничением памяти [8], иерархический A^* [9] и A^* с динамическим изменением весов ребер [10, 11]

Алгоритм D^* [6] оптимизирован для планирования пути в динамической среде, когда информация обновляется в процессе движения робота, например, при обнаружении новых препятствий.

Отметим, что рассмотренные методы планирования пути, как правило дают негладкие траектории. В этой связи они дополняются различными алгоритмами сглаживания траекторий движения [12, 13].

Гладкие траектории движения обеспечиваются при использовании для планирования метода потенциальных полей [14, 15]. В связи со своей простотой, высокой вычислительной эффективностью и указанной возможностью получения гладких траекторий движения метод потенциальных полей получил широкое рас-

пространение [16–19]. Однако имеется ряд проблем, к которым относятся локальные минимумы, сложность учета динамики подвижного объекта и обоснованный выбор отталкивающих и притягивающих сил [20]. Существующие подходы решают указанные проблемы в частных случаях. В этой связи потенциальные поля часто используются как составная часть алгоритмов планирования [21–23].

Популярными в последнее время стали методы планирования с использованием интеллектуальных технологий, в частности обучающихся систем [24–27]. Достоинством нейросетевых методов планирования является их высокая адаптивность к неопределенным динамическим средам. Основным недостаток таких систем планирования – высокие требования к бортовым вычислительным системам [16].

В данной статье изучаются графовые методы, обладающие рядом преимуществ, к которым относятся их масштабируемость, отсутствие длительной настройки, возможность учитывать кинематические и динамические ограничения, возможность применения в динамических средах и в условиях увеличения области видимости карты, возможность применения в многомерных пространствах. Имеются и недостатки графовых подходов, которые требуют большого времени и объема памяти для расчетов и, часто, медленно сходятся к оптимальному решению.

Алгоритмы, базирующиеся на представлении состояний подвижного объекта в виде графа, широко распространены [4]. К ним относятся алгоритм планирования с построением графа видимости [28], диаграмм Вороного [29], быстрорастущих случайных деревьев [30], дорожных карт [31].

Узлами графа видимости являются множество вершин полигональных препятствий и начальное и конечное положение робота. Ребрами графа являются связи между вершинами, которые не пересекаются с препятствиями. Основным ограничением алгоритма построения графа видимости является его высокая вычислительная сложность, которая оценивается как $O(n^2 \log(n))$, где n – число узлов. Высокая сложность построения графа определяется необходимостью проверять пересечения с препятствиями всех прямых, соединяющих попарно вершины. Тем не менее данный метод сегодня может успешно применяться в прикладных задачах.

Так в работе [32] рассмотрена задача планирования пути безэкипажного катера в акватории побережья Южной Кореи. Из-за большого числа островов граф содержит 54625 вершин. В этой связи прямое построение графа видимости нецелесообразно. Поэтому в статье вначале применяется адаптивное разбиение сетки, используя технологию дерева квадрантов (quadtree) [33]. Далее алгоритмом Дейкстры находится путь на дереве квадратов и строится граф видимости с использованием полученных точек пути. Кратчайший путь ищется на полученном графе видимости. В статье приводятся результаты моделирования, которые показывают более высокое быстродействие при использовании технологии дерева квадрантов по сравнению с остальными сетками, например, регуляторной сеткой. Однако сравнения метода построения графа видимости с другими методами не проведено.

В работе [34] граф видимости используется совместно с алгоритмом быстрорастущих случайных деревьев. Вначале используется двунаправленный метод случайных деревьев, в ходе которого строятся графы из начальной и целевой точек. Возможность соединить указанные деревья осуществляется с помощью графа видимости. Предложенный метод продемонстрирован на примерах с небольшим числом препятствий, т.е. в среде, которая не представляет большой вычислительной сложности для построения графа видимости.

Таким образом, графы видимости могут применяться для планирования пути при небольшом количестве препятствий или при предварительной обработке карты.

Диаграмма Вороного представляет собой разбиение плоскости с n центрами на множество выпуклых многогранников таким образом, чтобы любая точка внутри многогранника находилась ближе к своему центру, чем к другим центрам

[29, 35]. Это свойство позволяет планировать путь, наиболее удаленный от препятствий, если центры последних выступают в качестве точек для диаграммы Вороного. Вычислительная сложность построения диаграммы Вороного оценивается как $O(n \cdot \log(n))$ [35], поэтому они, как и графы видимости, используются в совокупности с другими методами планирования или с дополнительными алгоритмами, которые позволяют уменьшить число рассматриваемых точек и применять алгоритм в динамических средах.

Так, в работах [36, 37] рассматривается задача планирования пути с использованием диаграмм Вороного с динамическим обновлением текущей и целевой точек. В [36] используется сочетание диаграмм Вороного и дорожных карт для построения пути. Предложен алгоритм, который осуществляет удаление старых и добавление новых текущей и целевой точки. Полученные результаты сравниваются путем моделирования с методом планирования, использующим граф видимости. В работе [37] рассматривается задача планирования пути, состоящего из прямых линий, с использованием метода обобщенных диаграмм Вороного. При этом также применяется процедура добавления и удаления точек, которая позволяет устранять лишние углы при планировании маршрута. Сравнение с другими методами аналогичного класса осуществляется на относительно простой карте.

В работе [38] метод диаграмм Вороного используется для построения начального пути, который затем оптимизируется дополнительными алгоритмами, включая сплайны и метод потенциальных полей. В данной статье рассмотрены среды с препятствиями, представленными окружностями. В силу того, что последние могут пересекаться, возникает проблема локальных минимумов, которую для указанного типа среды авторам удастся решить.

Таким образом, основными недостатками метода диаграмм Вороного является его низкая вычислительная эффективность, которая требует применения дополнительных алгоритмов и обработки карты.

Метод дорожных карт [39] применяется при решении задач локального и глобального планирования. Планирование здесь проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется подготовка карты посредством генерации на ней случайным образом заданного числа путевых точек – узлов будущего графа. При генерации новой точки осуществляется проверка на пересечения новой точки с препятствием – сохраняются только те точки, которые сгенерированы в свободной от препятствий области карты. На втором этапе осуществляется Построение свободных от столкновений ребер между сгенерированными ранее вершинами. По полученному графу осуществляется поиск пути между любыми двумя узлами.

В силу высоких вычислительных затрат, основные усилия исследователей направлены на повышение эффективности метода дорожных карт, особенно для узких сред [40–42, 44]. Ключевую роль здесь играет способ генерирования новых потенциальных узлов графа. Так в работе [40] предложен метод планирования пути, использующий алгоритм случайной дорожной карты. Разработана новая процедура генерирования узлов в ограниченной области, эффективность которой показана сравнением с оригинальным методом случайной дорожной карты в стесненном пространстве. В работе [41] также изучается проблема повышения метода дорожных карт в узких пространствах. Для этого используются виртуальные поля, определяющие пространства, в которых генерируются потенциальные новые узлы дорожной карты. Проведены численные эксперименты, подтверждающие снижение времени построения траектории методом дорожной карты в узких местах.

Аналогичная проблема рационального создания дорожной карты решается в работах [42, 44]. В работе [42] предлагается метод нахождения ближайших соседей, использующий хеширование, зависящее от текущего положения [43]. Исследована эффективность методом моделирования по сравнению с другими метода-

ми, включая полный перебор. Недостатком работы является тот факт, что начальная дорожная карта задана пустой, что ограничивает использование метода для перестроения уже имеющегося пути. Такая необходимость может возникнуть в динамической среде.

В работе [44] предложена новая стратегия построения дорожной карты, нацеленная на максимизацию ее видимости при генерировании новых узлов. При этом узлы генерируются в узком коридоре на некотором расстоянии друг от друга. Смещение узлов осуществляется вдоль узкого коридора. В статье показана эффективность предложенной стратегии в трубах средах с окнами и другими узостями.

Таким образом, метод дорожных карт является распространенным при планировании пути, однако его вычислительная эффективность снижается в лабиринтах, коридорах, проходах и других узких местах.

Метод быстрорастущих случайных деревьев (RRT – rapidly random trees) вычислительно более эффективен по сравнению с методом дорожных карт. Он позволяет строить физически реализуемый путь, учитывая динамику мобильного робота [45, 46]. Однако основные ограничения данного метода для использования в динамических средах – низкая сходимости к оптимальному решению и высокие требования к используемой памяти. По этой причине повышение вычислительной эффективности позволит расширить область применения метода случайных быстрорастущих деревьев. В этой связи рассмотрим более детально работы, направленные на повышение эффективности указанного метода.

Проблема применения алгоритм RRT в условиях частичной неопределенности рассмотрена в работе [45], в которой предложено делить область функционирования на отдельные регионы. Для нахождения путей между регионами используется алгоритм RRT. Планирование пути внутри локальных регионов осуществляется простым алгоритмом, использующим отрезки прямых линий. Неопределенность модели мобильного робота учтена путем добавления возмущающего входа типа «белый шум» [47]. Неопределенность карты учтена введением вероятности того, что ячейка карты занята препятствием. Основным результатом, представленным в данной работе – метод, гарантирующий успешное достижение целевой точки с вероятностью не менее заданного значения p_{min} . Авторы работы [45] приводят результаты анализа и моделирования движения робота, представленного уравнениями кинематики материальной точки в статической среде. Основным недостатком метода – значительный рост вычислительной сложности при увеличении значения p_{min} .

Проблема уменьшения вычислительной сложности и требуемой памяти рассмотрена также в работах [46, 48]. В работе [46] комбинируются алгоритм RRT и искусственные потенциальные поля (метод P-RRT*). В этом методе случайное дерево строится в направлении уменьшения потенциального отталкивающего поля, что позволяет повысить скорость сходимости к оптимальной траектории. В [46] используется улучшенная версия алгоритма RRT* [49]. В работе [48] также используются потенциальные поля для генерирования новых точек, однако дерево растет как из начальной, так и из конечной точек. При этом оба дерева создают притягивающие поля друг для друга. Вычислительная сложность метода остается достаточно высокой, кроме того методы [46, 48] дают негладкие траектории.

Двунаправленный рост случайного дерева в алгоритме RRT также используется для повышения скорости сходимости к оптимальному решению в работе [50]. Основные результаты работ [48, 50] указывают на то, что двунаправленный случайный поиск в комбинации с потенциальными полями позволяет уменьшить число итераций для нахождения кратчайшего пути. Также указанные алгоритмы позволяют двигаться в узких коридорах, не попадая в локальные минимумы. Для уменьшения объема требуемой памяти деревья вычисляются последовательно во времени, что увеличивает время расчетов.

В работе [51] используется двухэтапная процедура планирования пути в динамической среде. Глобальный планировщик вычисляет начальный путь первого приближения, используя алгоритм RRT. Далее применяется динамический планировщик, который изменяет положение узлов пути, используя отталкивающие и инерционные силы. Для учета движущихся препятствий используется процедура прогнозирования. В этой работе использована эвристическая оптимизационная функция, выбор которой зависит от различных требований и ограничений. Основная проблема метода – рациональный выбор этой функции.

В работе [52] рассмотрена проблема вычисления оптимального пути при необходимости посетить заданное множество точек. Для решения этой проблемы в среде с препятствиями строится лес деревьев [53], в котором деревья стартуют из заданных целевых точек. Указанный лес строится до тех пор, пока деревья не соединятся друг с другом. В данной работе развивается метод, предложенный в работе [54], в которой лес деревьев оптимизируется благодаря свойствам очереди узлов. В [53] метод исследуется в двумерной и трехмерном пространствах, используя численное моделирование. Достигается снижение вычислительной сложности и используемой памяти за счет того, что каждое дерево строится отдельно друг от друга. В этой связи узлы отдельных деревьев хранятся в отдельных массивах.

В работе [55] предложен улучшенный алгоритм RRT* – быстрый алгоритм Q-RRT*, который рассматривает в качестве возможных родительских вершин не только вершин, содержащихся в гиперсфере, как в RRT*, но и их собственные родительские вершины с точностью до определенного пользователем параметра. Это может приводить к получению путей с меньшей стоимостью, чем у RRT*. Предложенный алгоритм позволяет устранять небольшие повороты и быстрее работает в узких проходах. Также разработаны предвзято-жадный RRT алгоритм [56] и мета-алгоритм [57], которые позволяют более эффективно строить начальный путь.

В работе [13] предложен двухэтапный алгоритм планирования, в котором для учета динамических ограничений мобильного робота на карту добавляются виртуальные препятствия, перекрывающие невыполнимые участки движения [59]. В качестве алгоритма глобального планирования используется модифицированная версия алгоритма RRT – алгоритм MPN-RRT. В этом алгоритме, в отличие от оригинальной версии, используется несколько родительских узлов, что уменьшает длину запланированной траектории по сравнению с исходной версией RRT с одним узлом. Методами численного моделирования показано, что использование двух родительских узлов позволяет уменьшить среднюю длину пути для городской среды с низкой плотностью застройки. Для решения проблемы медленной сходимости алгоритмов, основанных на случайном поиске и сглаживании путей, алгоритм RRT дополнен алгоритмом локальной оптимизации. Алгоритм RRT ищет глобальный путь, который сглаживается и оптимизируется итеративным локальным алгоритмом, предложенном в [59, 60].

Таким образом, различные варианты алгоритма RRT оптимизируются путем настройки параметров и модификации способов решения различных задач в ходе поиска пути. В общем случае, оптимизируются количество допустимых итераций построения дерева, рабочая область на карте, радиус исследуемой области вокруг узла дерева. Также варьируются закон выбора случайной точки на карте, в сторону которой растет дерево, алгоритм построения нового ребра и алгоритм выбора нового родительского узла.

В данной статье ставится задача разработать модифицированный алгоритм RRT, по времени расчета более эффективный, чем классический алгоритм RRT. Ставится задача провести также исследование предложенного алгоритма в сравнении с классическим методом RRT и другими методами планирования движения.

Математическое описание движения робота и среды. В общем случае модель робота может быть представлена уравнениями кинематики и динамики твердого тела и исполнительных механизмов [61, 62]. При планировании движения распространенной формой математической модели являются уравнения кинематики и динамики материальной точки, для наземного колесного робота могут быть представлены в виде [13, 16, 21]

$$\dot{x} = (\omega_l + \omega_r)r \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\dot{y} = (\omega_l + \omega_r)r \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = (\omega_l - \omega_r) \frac{r}{l}, \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_l = k_1 u_l, \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_r = k_2 u_r, \quad (5)$$

где (x, y) – линейные координаты робота; φ – угол ориентации робота; ω_l, ω_r – скорости вращения левого и правого колес; u_l, u_r – управляющие воздействия; r – радиус колес; l – расстояние между колесами; k_1, k_2 – постоянные коэффициенты.

Среда функционирования робота представлена на рис. 1.

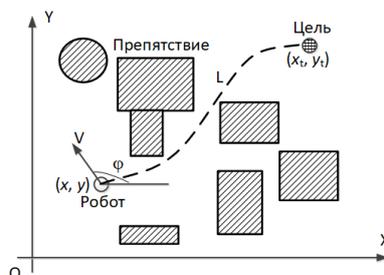


Рис. 1. Среда функционирования робота

Робот с координатами (x, y) обозначен на рис. 1 незаштрихованной окружностью. Цель с координатами (x_t, y_t) представлена в виде окружности с двойной штриховкой. Препятствия показаны заштрихованными прямоугольниками и окружностями. Отдельные препятствия могут образовывать сложные конфигурации, тушки, стенки, лабиринты и пр. Т.к. препятствия могут образовывать произвольные конфигурации, то нет большой разницы, какую форму имеют единичные препятствия. В силу этого далее будут использованы обе формы – прямоугольники и окружности. Траектория показана пунктирной линией.

Задача заключается в планировании траектории движения L , свободной от коллизии, таким образом, чтобы:

- ◆ при заданном времени расчета tp длина траектории L была минимизирована;
- ◆ при выполнении условия $L \leq L_{\text{доп}}$ время расчета не превышало заданного значения $t_{\text{доп}}$.

В качестве базового алгоритма принимается алгоритм RRT, который позволяет обойти проблему локальных минимумов, может применяться в неопределенных условиях, но, как отмечалось ранее, требует длительного времени расчета.

Модифицированный алгоритм быстрорастущих случайных деревьев.

Для повышения эффективности классического метода быстрорастущих случайных деревьев применяется следующая эвристика, используемая с целью компенсации существующих недостатков классического метода, позволяющая сократить время сходимости дерева при поиске пути и сократить объем требуемой памяти. Такая оптимизация достигается за счет следующих принципов:

- ◆ вместо проверки свободного пути из текущего узла в конечную точку осуществляется проверка наличия пути из текущей точки в свободную от препятствий область вокруг этой конечной точки, как показано на рис. 2;

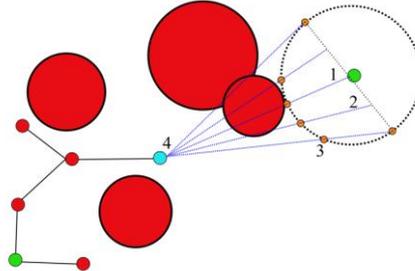


Рис. 2. Проверка пути в область вблизи целевой точки

- ◆ вместо проверки свободного пути из потенциального узла в родительский узел осуществляется проверка наличия пути из текущего потенциального узла в свободную от препятствий область вокруг этого родительского узла.

На рис. 3 представлена блок-схема модифицированного алгоритма с учетом перечисленных ранее принципов.

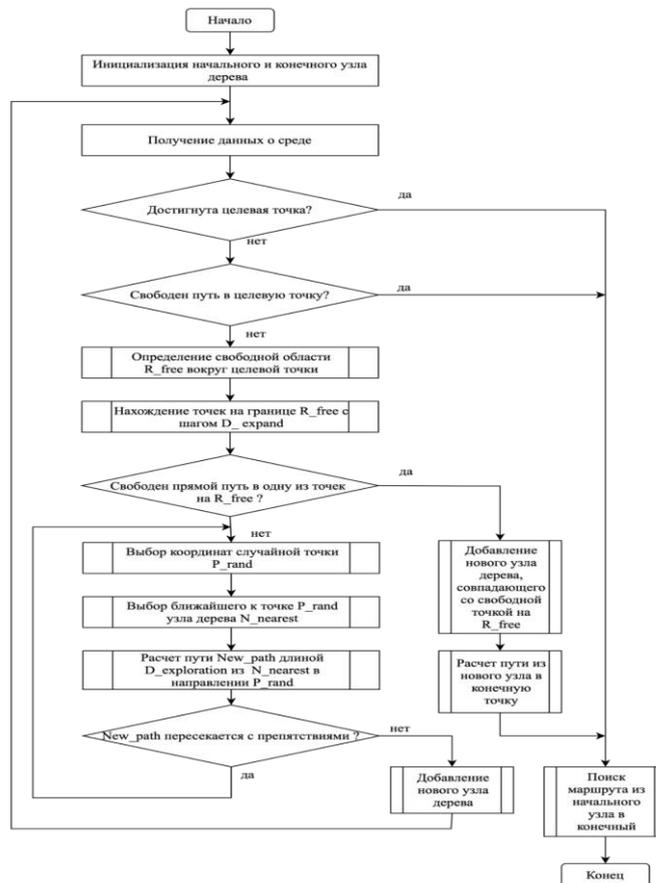


Рис. 3. Модифицированный алгоритм RRT

Основная часть алгоритма RRT осталась неизменной. Отличие предложенного алгоритма в дополнительной проверке. Перед формированием нового узла проверяется наличие свободного прямого пути из текущего узла 4 на рис. 2 в конечную точку 1. В случае, если прямой путь пересечен препятствиями, производится расчет свободной области вокруг целевой точки. Через центр свободной области строится диаметр, на него с заданным шагом d_{expand} из текущего узла строятся прямые. На пересечении прямых с границей свободной области инициализируются узлы (например, узел 3 на рис. 2). Осуществляется проверка наличия свободного прямого пути из текущего узла в узел на границе свободной области. Если в результате проверок был найден свободный прямой путь из текущего узла, то производится прокладка прямого пути.

Далее по построенному графу осуществляется нахождения маршрута из начальной точки в конечную и алгоритм завершает выполнение. В противном случае алгоритм продолжает строить граф в соответствии с классическим методом.

Аналогичным образом осуществляется проверка свободного пути из нового сгенерированного узла в родительский узел.

Таким образом применение предложенного эвристического метода расширяет список настраиваемых параметров алгоритма планирования. В реализованном классическом алгоритме настраиваются: размер области `rand_area`, в рамках которой в конфигурационном пространстве осуществляется выбор случайной точки; максимальное расстояние `expand_dist`, на которое от родительского узла в сторону случайной точки пространства, может вырасти ветка дерева; вероятность `goal_sample_rate`, с которой конечная точка пути выбирается в качестве точки, в направлении которой растет ветка дерева; максимальное количество `max_iter` попыток построить новый узел дерева. При превышении этого числа алгоритм прекращает работу.

В силу того, что проверка пути в заданную область вносит дополнительные вычислительные затраты, она осуществляется не каждый шаг. В этой связи дополнительным настраиваемым параметром является частота проверки наличия пути на границу свободной зоны вокруг целевой точки `straight_path_to_area_check`.

Определение наличия прямого пути из текущего узла на границу свободной области вокруг целевой точки или сгенерированного нового узла осуществлено по следующему алгоритму:

Шаг 1. Расчет радиуса свободной зоны вокруг целевой точки или сгенерированного нового узла: R_{free} – равен расстоянию до границы ближайшего препятствия.

Шаг 2. Сегментация диаметра свободной зоны d_{free} на отрезки с заданным в параметрах алгоритма шагом d_{expand} .

Шаг 3. Нахождение точек пересечения прямых из текущего узла в точки на диаметре свободной зоны с границей свободной зоны.

Шаг 4. Определение наличия свободного от столкновений пути по одной из прямых, идущей из текущего узла в точку на границе свободной зоны вокруг целевой точки.

Исследование модифицированного алгоритма быстрорастущих случайных деревьев по сравнению с классическим RRT. В ходе исследования было проведено сравнительное моделирование двух методов: классического алгоритма RRT и модифицированного алгоритма, представленного на рис. 3. Алгоритмы были описаны на программном языке Python 3.9. Моделирование проведено посредством программной симуляции в интегрированной среде разработки PyCharm.

Моделируемая среда представлена в виде двумерной координатной сетки, в каждой точке которой может находиться робот, описываемый точкой позиционирования (x, y) и угол ориентации φ (рис. 1). Препятствия описаны набором окружностей, который включают к себя буферную область безопасности. Единичное

действие подразумевает изменение состояния агента, а именно одной или нескольких его координат (x, y, φ) . Моделирующий комплекс в среде PyCharm реализован в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

Подвижный объект представлен уравнениями (1)–(5). Моделирование блоков навигационной системы и системы технического зрения реализовано в соответствии с описанием, представленным в [63]. Расчет глобального пути реализуется в системе планирования пути, в рамках которой реализован как классический RRT, так и предложенный в данной статье модифицированный вариант. Датчики исполнительных механизмов приняты идеальными, а сами исполнительные механизмы – пропорциональными безынерционными звеньями. Регулятор синтезирован методом позиционно-траекторного управления [16, 62, 64, 65]

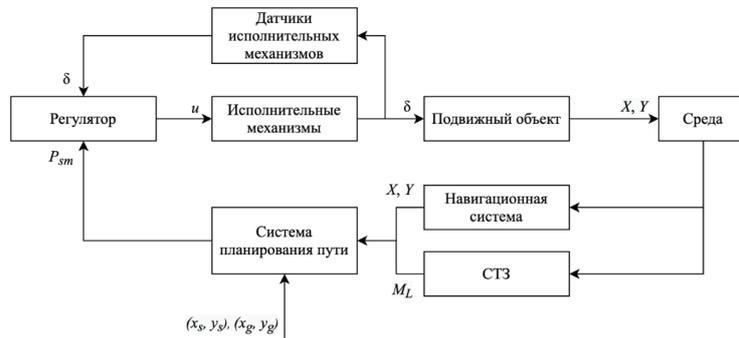


Рис. 4. Функциональная схема моделирующего комплекса

Каждое препятствие в виде круга описывается упорядоченным списком вида:

$$(x_{obst}, y_{obst}, r_{obst}), \quad (6)$$

где x_{obst}, y_{obst} – координаты центра препятствия, r_{obst} – радиус опасной зоны вокруг центра препятствия.

Прямоугольное препятствие описывается кортежем вида:

$$(x_{obst}, y_{obst}, a_{obst}, b_{obst}), \quad (7)$$

где x_{obst}, y_{obst} – координаты левого нижнего угла препятствия, a_{obst}, b_{obst} – ширина и длина препятствия.

В настоящем исследовании проведено 270 000 итераций моделирования. Каждая итерация включает в себя следующие шаги:

1. Генерация случайной ситуации на карте: координат начальной и конечной точек траектории, заданное число N_{obst} препятствий со случайными параметрами.

2. Моделирование движения робота на сгенерированной карте с использованием классического алгоритма RRT.

3. Моделирование движения робота на сгенерированной карте с использованием модифицированного алгоритма RRT.

4. Фиксация показателей работы классического и модифицированного алгоритмов RRT. К показателям относятся: время работы алгоритма (t_{RRT}, t_{new_RRT}); объем требуемой памяти (m_{RRT}, m_{new_RRT}); длина полученного пути (l_{RRT}, l_{new_RRT}); частота успешного достижения цели без коллизий (f_{RRT}, f_{new_RRT}).

Моделирование проведено в различных условиях. Серия запусков осуществлена на картах разной размерности $map_{din} = [50:50, 500:500, 5000:5000]$, с различным числом препятствий $map_{obst} = [10, 30, 50]$, с различными положениями начальной и целевой точек.

Настраиваемые параметры классического и модифицированного алгоритмов RRT на протяжении всех экспериментов были идентичны.

Результаты моделирования подставлены в табл. 1–3. Примеры работы классического и модифицированного алгоритмов RRT представлены на рис. 5 и 7. В таблицах приняты обозначения: t_{cp} – среднее время работы, m_{cp} – средний объем занимаемой памяти, l_{cp} – средняя длина пути, i_n – процент неудачных итераций моделирования, i_{max} – максимальное число итераций, map_{din} – размерность карты.

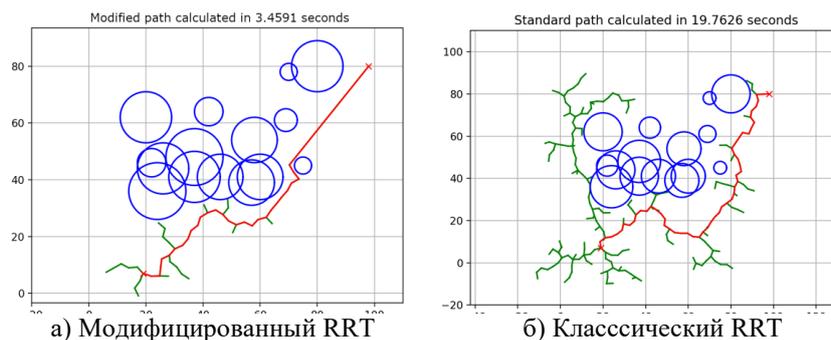


Рис. 5. Пример моделирования классического и модифицированного методов RRT для построения пути

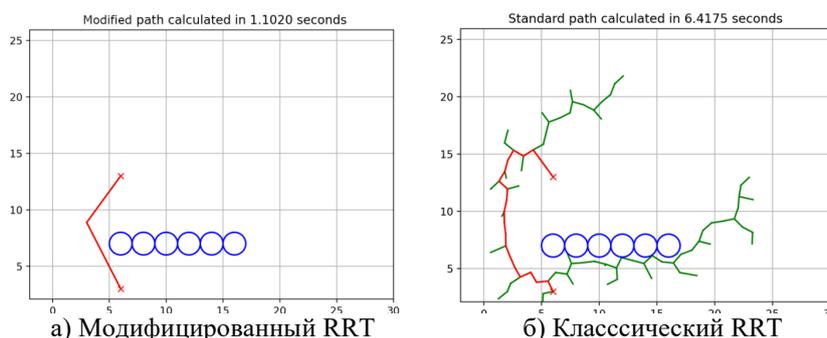


Рис. 6. Пример моделирования классического и модифицированного методов RRT для построения пути при наличии стены

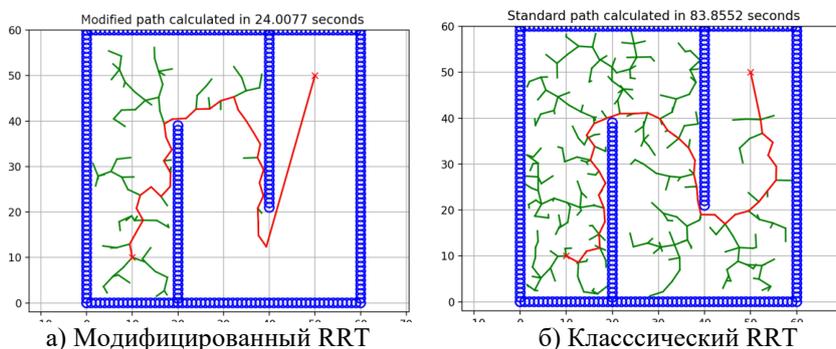


Рис. 7. Пример моделирования классического и модифицированного методов RRT для построения пути при наличии двух стен

Согласно данным, представленным в табл. 1 использование модифицированного метода в смоделированных условиях, в зависимости от размера карты и максимального числа итераций позволило сократить время расчета в пределах 64.0–90.3%, снизить объем используемой памяти на 84.0–95.0%, уменьшить длину траектории на 14.0–16.0%. Кроме того, классический метод RRT не успел найти текущий путь, в зависимости от размера карты и максимального числа итераций в 0,02–7.7% случаев. В то же время модифицированный алгоритм RRT нашел путь в 100% случаев. Всего было проведено 90000 экспериментов с описанными выше параметрами.

Таблица 1

Результаты моделирования при $N_{obst} = 10$

i_{max}	Метод	t_{cp} , сек			l_{cp} , ед.		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	0.0033	0.0202	0.0394	354629	3082035	4538360
	M-RRT	0.0003	0.0029	0.0141	298781	2608382	3806890
1500	RRT	0.0036	0.0244	0.1115	345404	3433538	21050822
	M-RRT	0.0003	0.0035	0.0365	355429	2917069	17944797
3000	RRT	0.0039	0.0260	0.1789	299590	3455666	33398372
	M-RRT	0.0003	0.0037	0.0642	300434	2937640	28738863
i_{max}	Метод	m_{cp} , байт			i_n , %		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	1053.80	3041.87	4000.77	0.36%	7.84%	76.85%
	M-RRT	169.66	219.89	216.09	0.0%	0.0%	0.0%
1500	RRT	1071.51	3320.04	7464.29	16.82%	0.82%	27.54%
	M-RRT	171.50	245.39	340.73	0.04%	0.0%	0.0%
3000	RRT	1088.93	3373.34	9584.43	0.0%	0.21%	1.9%
	M-RRT	172.61	257.74	488.63	0.0%	0.0	0.0%

Таблица 2

Результаты моделирования при $N_{obst} = 30$

i_{max}	Метод	t_{cp} , сек			l_{cp} , ед.		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	0.0097	0.0266	0.0591	338108	1709574	2760827
	M-RRT	0.0051	0.0141	0.0400	326533	1565291	2387731
1500	RRT	0.015	0.0474	0.1374	399790	2930239	11103805
	M-RRT	0.008	0.0309	0.1135	385079	2745523	10001515
3000	RRT	0.0190	0.1124	0.2827	413072	3305314	29437582
	M-RRT	0.0104	0.0619	0.2288	400049	3106780	27433970
i_{max}	Метод	$m_{среднее}$, байт			$i_{неудачных}$, %		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	1224.01	2502.32	3475.78	11.7%	43.22%	84.5 %
	M-RRT	636.28	713.05	488.05	1.69%	1.52%	0.13%
1500	RRT	1541.64	3455.61	6107.81	3.05%	18.16%	57.96%
	M-RRT	816.14	1229.59	1238.44	0.4%	1.41%	0.6%
3000	RRT	1679.25	5821.56	6905.18	0.74%	11.76%	17.52%
	M-RRT	914.10	2105.76	2254.93	0.08%	0.93%	1.25%

Согласно данным, представленным в табл. 2 использование модифицированного метода при увеличенном числе препятствий позволило сократить время расчета в пределах 17.4–46.8%, снизить объем используемой памяти на 45.6–86.0%, уменьшить длину траектории на 3.0–13.5%. Кроме того, классический метод RRT не успел найти текущий путь, в зависимости от размера карты и максимального числа итераций в 0,13–11.7% случаев. В то же время модифицированный алгоритм RRT на нашел путь в 0–1.7% случаев. Всего было проведено 90000 экспериментов с описанными выше параметрами.

Анализируя данные, приведенные в табл. 3, определяем, что использование модифицированного метода, при числе препятствий 50, позволило сократить время расчета в пределах 14.3–47.3%, снизить объем используемой памяти на 29.8–80.2%, уменьшить длину траектории на 1.9–8.9%. Кроме того, классический метод RRT не успел найти текущий путь, в зависимости от размера карты и максимального числа итераций в 6,9–88.7% случаев. В то же время модифицированный алгоритм RRT на нашел путь в 0.2–4.6% случаев. Также было проведено 90000 экспериментов с описанными выше параметрами

Отметим, что с увеличением числа препятствий и размерности карты эффект от примененной в данной статье эвристики несколько снижается. Так на рис. 8–10 данные табл. 1–3 представлены в виде графиков, из которых видно, что на карте размерностью 5000×5000 при числе препятствий, равном 50, модифицированный алгоритм RRT по времени проигрывает классическому алгоритму, если максимальное число итераций более 1000. Это связано с тем, что на большой карте и при большом числе препятствий сложность определения прямого пути из текущей точки в заданную область возрастает.

Таблица 3

Результаты моделирования при $N_{obst} = 50$

i_{max}	Метод	t_{cp} , сек			l_{cp} , ед.		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	0.0133	0.0326	0.0772	222692	570338	1826683
	M-RRT	0.0088	0.0172	0.0652	216445	519433	1608241
1500	RRT	0.0268	0.0666	0.1600	345404	1370839	6354044
	M-RRT	0.0188	0.0486	0.1866	338594	1288650	5814408
3000	RRT	0.0463	0.1328	0.2980	427098	2317289	14420732
	M-RRT	0.0336	0.1062	0.4708	419115	2198826	13550898
i_{max}	Метод	m_{cp} , байт			i_n , %		
	map_{din}	50	500	5000	50	500	5000
700	RRT	1073.89	2456.67	3095.97	35.96 %	74.55 %	88.73 %
	M-RRT	679.88	691.59	612.80	4.63 %	1.14 %	0.2 %
1500	RRT	1625.69	3733.38	5158.43	16.82 %	53.0 %	72.33 %
	M-RRT	1089.77	1463.61	1390.18	3.14 %	3.0 %	1.29 %
3000	RRT	2174.86	5289.81	7529.37	6.94 %	33.07 %	51.21 %
	M-RRT	1526.72	2466.74	2863.20	1.11 %	3.53 %	2.67 %

В табл. 4 приведен процент выигрыша модифицированного алгоритма по всем критериям за все 270 000 проведенных экспериментов.

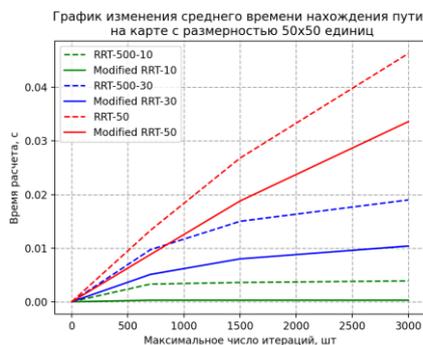


Рис. 8. График изменения времени поиска пути на карте 50x50

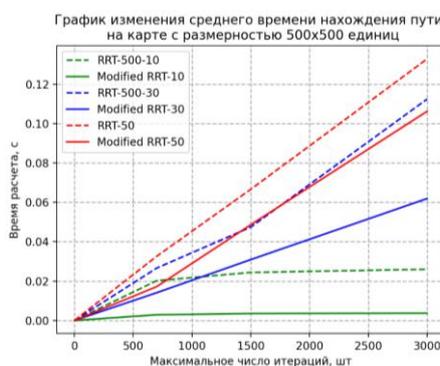


Рис. 9. График изменения времени поиска пути на карте 500x500

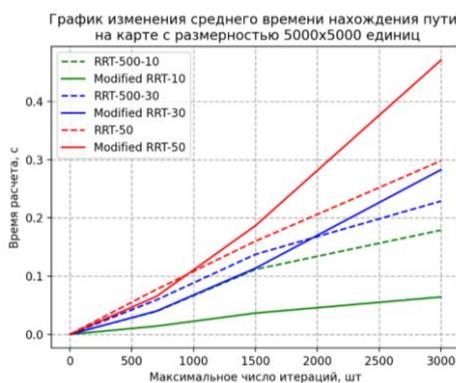


Рис. 10. График изменения времени поиска пути на карте 5000x5000

Таблица 4

Результаты моделирования, сгруппированные по размеру среды

Размерность карты	t_{cp} , сек	m_{cp} , байт	l_{cp} , ед.
50x50	55,48%	54,67%	8,03%
500x500	53,06%	70,56%	9,56%
5000x5000	21,16%	81,46%	11,27%

Заключение. Анализ результатов серии экспериментов позволяет сделать ряд выводов, чтобы определить, в каких ситуациях эффективно применение модифицированного алгоритма RRT, а в каких классического.

С ростом сложности среды – увеличением числа препятствий, преимущество модифицированного алгоритма по $t_{\text{среднее}}$, $m_{\text{среднее}}$ и $l_{\text{среднее}}$ падает, но сохраняется. Это обусловлено увеличением вычислительных затрат на определение наличия прямого пути – продолжительность этой процедуры прямо пропорционально связана с числом препятствий на карте. Этот недостаток возможно частично компенсировать оптимизацией расчетов вплоть до применения искусственных нейронных сетей. Снижение величины преимущества по $m_{\text{ср}}$ и $l_{\text{ср}}$ связано с увеличением количества маневров, которые агент должен совершать, обходя большое число препятствий. Большое число препятствий на карте снижает число участков, в прохождении которых модифицированный алгоритм дает выигрыш.

С ростом размерности среды преимущество модифицированного алгоритма по $t_{\text{ср}}$ снижается, но сохраняется. А преимущество по $m_{\text{ср}}$ и $l_{\text{ср}}$ увеличивается. Изменение преимущества по $t_{\text{ср}}$ связано с увеличением числа итераций роста дерева, которые выполняет алгоритм, соответственно модифицированный алгоритм выполняет большее число расчетов эвристики и затрачивает на них больше времени. Изменение по $m_{\text{ср}}$ и $l_{\text{ср}}$ связано с тем, что модифицированное RRT стремится расти в направлении целевой точки – при любой возможности путь будет проложен либо сразу в целевую точку, либо на границу свободной области вокруг нее, классическое дерево, напротив, растет хаотично – итоговый граф получается большим и содержит много изгибов, соответственно, на хранение его требуется больше памяти, а путь получается более ломаным и за счет этого немного длиннее.

Использование модифицированного алгоритма увеличивает процент вероятности нахождения решения в рамках заданных требований к допустимому числу итераций роста дерева i_{max} . Из всех экспериментов модифицированный алгоритм не нашел решение в 1,07% случаев, классический в 30,13%.

Таким образом, модифицированный алгоритм продемонстрировал преимущество:

- ◆ в случаях незагруженной среды;
- ◆ в случаях, когда есть ограничение по максимальному числу итераций;
- ◆ в случаях, когда ограничен объем памяти, допустимый для хранения рассчитанного дерева.

К недостаткам алгоритма можно отнести зависимость временной вычислительной эффективности от размерности среды при средней и высокой загруженности карты.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-00533, выполняемого в АО "Научно-конструкторское бюро робототехники и систем управления".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гайдук А.П.* Применение пространства состояния к исследованию систем автоматического управления. – Таганрог: ТРТИ, 1979. – 100 с.
2. *LaValle S.* Planning Algorithms. – Cambridge University Press, 2006. – 842 p.
3. *Lozano-Perez T.* Spatial planning: A configuration space approach // IEEE Transactions on Computers. – 1983. – Vol. 32 (2). – P. 108-120.
4. *Казakov К.А., Семенов В.А.* Обзор современных методов планирования пути // Тр. ИСП РАН. – 2016. – Т. 28 (4). – С. 241-294.
5. *Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.A.* Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – Vol. 2. – P. 100-107.

6. *Stentz A.* Optimal and efficient path planning for partially known environments // In *Intelligent Unmanned Ground Vehicles*. – Springer, Boston, MA, USA, 1997. – P. 203-220.
7. *Wang Q., Hao Y., Chen F.* Deepening the IDA* algorithm for knowledge graph reasoning through neural network architecture // *Neurocomputing*. – 2021. – Vol. 429. – P. 101-109.
8. *Zhou R., Hansen E.A.* Memory-Bounded {A*} Graph Search // *The Florida AI Research Society Conference – FLAIRS*. – 2002. – P. 203-209.
9. *Holte R., Perez M., Zimmer R., MacDonald A.* Hierarchical A*: Searching abstraction hierarchies efficiently // *Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence*. – 1996. – Vol. 1. – P. 530-535.
10. *Liu B., Xiao X., Stone P.* A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation // *In IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 1090-1096.
11. *Chen B.Y., Chen X.-W., Chen H.-P., Lam W.H.K.* Efficient algorithm for finding k shortest paths based on re-optimization technique // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2020. – Vol. 133. Article number 101819.
12. *Zhang X., Wylie B., Oscar C., Moore C.A.* Time-Optimal and Collision-Free Path Planning for Dual-Manipulator 3D Printer // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2020. – P. 2389-2396.
13. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Костоков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А.* Алгоритмы планирования траекторий в двумерной среде с препятствиями // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – Vol. 21 (3). – P. 459-492. – <https://doi.org/10.15622/ia.21.3.1>.
14. *Khatib O.* Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // *International Journal of Robotics Research*. – 1986. – Vol. 5 (2). – P. 90-98.
15. *Платонов А.К., Карнов И.И., Кирильченко А.А.* Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // *Препринт Института прикладной математики АН СССР*. – М.: 1974. – 27 с.
16. *Pshikhopov V.Kh. (Ed.), Beloglazov D., Finaev V., Guzik V., Kosenko E., Krukhmaev V., Medvedev M., Pereverzev A., Pyavchenko A., Saprykin R., Shapovalov I., Soloviev V.* Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments. – Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2017. – 312 p. – ISBN: 9780128123058.
17. *Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.* Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2019. – Т. 20 (11). – С. 677-685.
18. *Woods A.C., La H.M.* A Novel Potential Field Controller for Use on Aerial Robots // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2019. – Vol. 49 (4). – P. 665-676.
19. *Koren Y., Borenstein J.* Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // *International Conference on Robotics and Automation*. – 1991. – Vol. 2. – P. 1398-1404.
20. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 60. – С. 39-63.
21. *Malone N., Chiang H.-T., Lesser K., Oishi M., Tapia L.* Hybrid Dynamic Moving Obstacle Avoidance Using a Stochastic Reachable Set-Based Potential Field // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2017. – Vol. 33 (5). – P. 1124-1138.
22. *Friudenberg P., Koziol S.* Mobile Robot Rendezvous Using Potential Fields combined With Parallel Navigation // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 16948-16957.
23. *Fedele G., D'Alfonso L., Chiaravalloti F., D'Aquila G.* Obstacles Avoidance Based on Switching Potential Functions // *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. – 2018. – Vol. 90 (3-4). – P. 387-405.
24. *Гайдук А.Р., Мартьянов О.В., Медведев М.Ю., Пилюхов В.Х., Хамдан Н., Фархунд А.* Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21 (8). – С. 470-479.
25. *Medvedev M., Pshikhopov V.* Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks // *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. – 2020. – P. 51-62.
26. *Wang Y., Cheng L., Hou Z.-G., Yu J., Tan M.* Optimal Formation of Multirobot Systems Based on a Recurrent Neural Network // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2016. – Vol. 27 (2). – P. 322-333.

27. Güzel M., Ajabshir V., Nattharith P., Gezer E., Can S. A Novel Framework for Multi-Agent Systems Using a Decentralized Strategy // *Robotica*. – 2019. – Vol. 37 (4). – P. 691-707. – DOI: 10.1017/S0263574718001261.
28. De Berg M., Cheong O., Van Kreveld M., Overmars M. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. – 3rd ed. – Springer-Verlag, 2008. – 386 p.
29. Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M. Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams // *Algorithmica*. – 1992. – Vol. 7 (1). – P. 381-413.
30. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects // *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*. – 2000. – P. 293-308.
31. Kedem K., Sharir M. An efficient motion planning algorithm for a convex rigid polygonal object in 2-dimensional polygonal space // *Discrete Computational Geometry*. – 1990. – Vol. 5 (1). – P. 43-75.
32. Lee W., Choi G.-H., Kim T.-W. Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation // *Applied Ocean Research*. – 2021. – Vol. 117.
33. Finkel R., Bentley J.L. Quad Trees: A Data Structure for Retrieval on Composite Keys // *Acta Informatica*. – 1974. – Vol. 4 (1). – P. 1-9. – DOI: 10.1007/BF00288933.
34. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph // *International Journal of Information Technology*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1513-1519. – <https://doi.org/10.1007/s41870-021-00696-w>.
35. Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю., Крухмалев В.А., Медведев М.Ю., Переверзев В.А., Пшихопов В.Х., Пьявченко А.О., Сапрыкин П.В., Соловьев В.В., Финаев В.И., Чернухин Ю.В., Шаповалов И.О. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с. – ISBN 978-5-9221-1595-7.
36. Bhattacharya P., Gavrilova M.L. Roadmap-Based Path Planning - Using the Voronoi Diagram for a Clearance-Based Shortest Path // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. – 2008. – Vol. 15 (2). – P. 58-66. – DOI: 10.1109/MRA.2008.921540.
37. Al-Dahhan M.R.H., Schmidt K.W. Voronoi Boundary Visibility for Efficient Path Planning // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 134764-134781. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010819.
38. Magid E., Lavrenov R., Svinin M., Khasianov, A. Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning. In: Gusikhin O., Madani K. (eds) // *Informatics in Control, Automation and Robotics. ICINCO 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering*. – Vol 495. – Springer, Cham, 2020. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-11292-9_24.
39. Kavragi L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces // *IEEE transactions on Robotics and Automation*. – 1996. – Vol. 12 (4). – P. 566-580. – DOI: 10.1109/70.508439.
40. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – Vol. 834. – Springer, Singapore, 2022. – https://doi.org/10.1007/978-981-16-8484-5_42.
41. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 72.
42. Rantanen M.T., Juhola M. Speeding up probabilistic roadmap planners with locality-sensitive hashing // *Robotica*. – 2015. – Vol. 33 (7). – P. 1491-1506.
43. Buaba R., Homaiyar A., Gebril M., Kihn E. Satellite Image Retrieval Application Using Locality Sensitive Hashing in L2-Space // *Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2011*. – P. 1-7.
44. Kala R. Increased Visibility Sampling for Probabilistic Roadmaps // *IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, Brisbane, AUSTRALIA, 2018*. – P. 87-92.
45. Chakravorty S., Kumar S. Generalized Sampling-Based Motion Planners // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics*. – 2011. – Vol. 41 (3).
46. Qureshi A., Ayaz Y. Potential functions based sampling heuristic for optimal path planning // *Autonomous Robot*. – 2016. – Vol. 40. – P. 1079-1093.
47. Cheng G.-R., Ma M.-C., Tan L.-G., Song S.-M. Gaussian estimation for non-linear stochastic uncertain systems with time-correlated additive noises and packet dropout compensations // *IET Control Theory Appl.* – 2022. – Vol. 16. – P. 600-614. – <https://doi.org/10.1049/cth2.12252>.

48. Wang X., Li X., Guan Y., Song J., Wang R. Bidirectional Potential Guided RRT* for Motion Planning // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 95046-95057.
49. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // *The International Journal of Robotics Research*. – 2011. – Vol. 30 (7). – P. 846-894.
50. Chen L., Shan Y., Tian W., Li B., Cao D. A Fast and Efficient Double-Tree RRT*-Like Sampling-Based Planner Applying on Mobile Robotic Systems // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2018. – Vol. 23 (6). – P. 2568-2578.
51. Wang J., Meng M.Q.-H., Khatib O. EB-RRT: Optimal Motion Planning for Mobile Robots // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 17 (4). – P. 2063-2073.
52. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees // *IEEE Robotics and Automation Letter*. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 4201-4208.
53. Devaurs D., Siméon T., Cortés J. A multi-tree extension of the transition-based RRT: Application to ordering-and-pathfinding problems in continuous cost spaces // *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.* – 2014. – P. 2991-2996.
54. Vonásek V., Penička R. Space-filling forest for multi-goal path planning // *In Proc. 24th IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Factory Automat.* – 2019. – P. 1587-1590.
55. Jeong I.-B., Lee S.-J., Kim J.-H. Quick-RRT*: Triangular inequality-based implementation of RRT* with improved initial solution and convergence rate // *Expert Systems with Applications*. – 2019. – Vol. 123. – P. 82-90.
56. Yang K. Anytime synchronized-biased-greedy rapidly-exploring random tree path planning in two dimensional complex environments // *International Journal of Control, Autom. Syst.* – 2011. – Vol. 9, No. 4. – P. 750.
57. Wang J., Chi W., Shao M., Meng M. Q.-H. Finding a high-quality initial solution for the RRTs algorithms in 2D environments // *Robotica*. – 2019. – Vol. 37, No. 10. – P. 1677-1694.
58. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions // *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. – 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
59. Медведев М.Ю., Костюков В.А., Пушхопов В.Х. Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // *Тр. СПИИРАН*. – 2020. – Т. 19 (1). – С. 43-78.
60. Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field // *Informatics and Automation*. – 2021. – Vol. 20 (3). – P. 690-726.
61. Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
62. Pshikhopov, V., Medvedev, M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81 (11). – P. 2078-2093. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
63. Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строим БЛА мультикоптерного типа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
64. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhnalev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. The 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014. – P. 8953-8958.
65. Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 3 (116). – С. 147-156.

REFERENCES

1. Gayduk A.R. *Primenenie prostranstva sostoyaniya k issledovaniyu sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Application of the state space to the study of automatic control systems]. Taganrog: TRTI, 1979, 100 p.
2. LaValle S. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006, 842 p.
3. Lozano-Perez T. Spatial planning: A configuration space approach, *IEEE Transactions on Computers*, 1983, Vol. 32 (2), pp. 108-120.

4. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremennykh metodov planirovaniya puti [Review of modern methods of path planning], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2016, Vol. 28 (4), pp. 241-294.
5. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, Vol. 2, pp. 100-107.
6. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments, *In Intelligent Unmanned Ground Vehicles*. Springer, Boston, MA, USA, 1997, pp. 203-220.
7. Wang Q., Hao Y., Chen F. Deepening the IDA* algorithm for knowledge graph reasoning through neural network architecture, *Neurocomputing*, 2021, Vol. 429, pp. 101-109.
8. Zhou R., Hansen E.A. Memory-Bounded {A*} Graph Search, *The Florida AI Research Society Conference – FLAIRS*, 2002, pp. 203-209.
9. Holte R., Perez M., Zimmer R., MacDonald A. Hierarchical A*: Searching abstraction hierarchies efficiently, *Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence*, 1996, Vol. 1, pp. 530-535.
10. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation, *In IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 1090-1096.
11. Chen B.Y., Chen X.-W., Chen H.-P., Lam W.H.K. Efficient algorithm for finding k shortest paths based on re-optimization technique, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, Vol. 133. Article number 101819.
12. Zhang X., Wylie B., Oscar C., Moore C.A. Time-Optimal and Collision-Free Path Planning for Dual-Manipulator 3D Printer, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, pp. 2389-2396.
13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Khusseyn F., Kadim A. Algoritmy planirovaniya traektoriy v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Algorithms for trajectory planning in a two-dimensional environment with obstacles], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and automation], 2022, Vol. 21 (3), pp. 459-492. Available at: <https://doi.org/10.15622/ia.21.3.1>.
14. Khaitib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5 (2), pp. 90-98.
15. Platonov A.K., Karpov I.I., Kiril'chenko A.A. Metod potentsialov v zadache prokladki trassy [The method of potentials in the task of laying a route], Preprint Instituta prikladnoy matematiki AN SSSR [Preprint of the Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences], Moscow: 1974, 27 p.
16. Pshikhopov V.Kh. (Ed.), Beloglazov D., Finaev V., Guzik V., Kosenko E., Krukhmalev V., Medvedev M., Pereverzev A., Pyavchenko A., Saprykin R., Shapovalov I., Soloviev V. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2017, 312 p. ISBN: 9780128123058.
17. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Voprosy upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov metodom potentsial'nogo navedeniya [Questions of controlling the movement of mobile robots by the method of potential guidance], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2019, Vol. 20 (11), pp. 677-685.
18. Woods A.C., La H.M. A Novel Potential Field Controller for Use on Aerial Robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, Vol. 49 (4), pp. 665-676.
19. Koren Y., Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *International Conference on Robotics and Automation*, 1991, Vol. 2, pp. 1398-1404.
20. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Group control of the movement of mobile robots in an uncertain environment using unstable modes], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2018, Issue 60, pp. 39-63.
21. Malone N., Chiang H.-T., Lesser K., Oishi M., Tapia L. Hybrid Dynamic Moving Obstacle Avoidance Using a Stochastic Reachable Set-Based Potential Field, *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, Vol. 33 (5), pp. 1124-1138.
22. Friudenberg P., Koziol S. Mobile Robot Rendezvous Using Potential Fields combined With Parallel Navigation, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 16948-16957.
23. Fedele G., D'Alfonso L., Chiaravalloti F., D'Aquila G. Obstacles Avoidance Based on Switching Potential Functions, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2018, Vol. 90 (3-4), pp. 387-405.

24. Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., khamdan N., Farkhud A. Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network control system for a group of robots in an indefinite two-dimensional environment] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21 (8), pp. 470-479.
25. Medvedev M., Pshikhopov V. Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 51-62.
26. Wang Y., Cheng L., Hou Z.-G., Yu J., Tan M. Optimal Formation of Multirobot Systems Based on a Recurrent Neural Network, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, Vol. 27 (2), pp. 322-333.
27. Güzel M., Ajabshir V., Nattharith P., Gezer E., Can S. A Novel Framework for Multi-Agent Systems Using a Decentralized Strategy, *Robotica*, 2019, Vol. 37 (4), pp. 691-707. DOI: 10.1017/S0263574718001261.
28. De Berg M., Cheong O., Van Kreveld M., Overmars M. Computational Geometry: Algorithms and Applications. 3rd ed. Springer-Verlag, 2008, 386 p.
29. Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M. Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams, *Algorithmica*, 1992, Vol. 7 (1), pp. 381-413.
30. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects, *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2000, pp. 293-308.
31. Kedem K., Sharir M. An efficient motion planning algorithm for a convex rigid polygonal object in 2-dimensional polygonal space, *Discrete Computational Geometry*, 1990, Vol. 5 (1), pp. 43-75.
32. Lee W., Choi G.-H., Kim T.-W. Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation, *Applied Ocean Research*, 2021, Vol. 117.
33. Finkel R., Bentley J.L. Quad Trees: A Data Structure for Retrieval on Composite Keys, *Acta Informatica*, 1974, Vol. 4 (1), pp. 1-9. DOI: 10.1007/BF00288933.
34. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph, *International Journal of Information Technology*, 2021, Vol. 13, pp. 1513-1519. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41870-021-00696-w>.
35. Beloglazov D.A., Guzik V.F., Kosenko E.Yu., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Pereverzev V.A., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I., Chernukhin Yu.V., Shapovalov I.O. Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p. ISBN 978-5-9221-1595-7.
36. Bhattacharya P., Gavrilova M.L. Roadmap-Based Path Planning - Using the Voronoi Diagram for a Clearance-Based Shortest Path, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2008, Vol. 15 (2), pp. 58-66. DOI: 10.1109/MRA.2008.921540.
37. Al-Dahhan M.R.H., Schmidt K.W. Voronoi Boundary Visibility for Efficient Path Planning, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 134764-134781. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010819.
38. Magid E., Lavrenov R., Svinin M., Khasianov, A. Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning. In: Gusikhin O., Madani K. (eds.), *Informatics in Control, Automation and Robotics. ICINCO 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol 495. Springer, Cham, 2020. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11292-9_24.
39. Kavvaki L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces, *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 1996, Vol. 12 (4), pp. 566-580. DOI: 10.1109/70.508439.
40. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 834. Springer, Singapore, 2022. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8484-5_42.
41. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, Vol. 72.
42. Rantanen M.T., Juhola M. Speeding up probabilistic roadmap planners with locality-sensitive hashing, *Robotica*, 2015, Vol. 33 (7), pp. 1491-1506.
43. Buaba R., Homatfar A., Gebriil M., Kihn E. Satellite Image Retrieval Application Using Locality Sensitive Hashing in L2-Space, *Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2011*, pp. 1-7.

44. Kala R. Increased Visibility Sampling for Probabilistic Roadmaps. *IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, Brisbane, AUSTRALIA. 2018, pp. 87-92.
45. Chakravorty S., Kumar S. Generalized Sampling-Based Motion Planners, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics*, 2011, Vol. 41 (3).
46. Qureshi A., Ayaz Y. Potential functions based sampling heuristic for optimal path planning, *Autonomous Robot*, 2016, Vol. 40, pp. 1079-1093.
47. Cheng G.-R., Ma M.-C., Tan L.-G., Song S.-M. Gaussian estimation for non-linear stochastic uncertain systems with time-correlated additive noises and packet dropout compensations, *IET Control Theory Appl.*, 2022, Vol. 16, pp. 600-614. Available at: <https://doi.org/10.1049/cth2.12252>.
48. Wang X., Li X., Guan Y., Song J., Wang R. Bidirectional Potential Guided RRT* for Motion Planning, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 95046-95057.
49. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning, *The International Journal of Robotics Research*, 2011, Vol. 30 (7), pp. 846-894.
50. Chen L., Shan Y., Tian W., Li B., Cao D. A Fast and Efficient Double-Tree RRT*-Like Sampling-Based Planner Applying on Mobile Robotic Systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, Vol. 23 (6), pp. 2568-2578.
51. Wang J., Meng M.Q.-H., Khatib O. EB-RRT: Optimal Motion Planning for Mobile Robots, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, Vol. 17 (4), pp. 2063-2073.
52. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees, *IEEE Robotics and Automation Letter*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 4201-4208.
53. Devaurs D., Siméon T., Cortés J. A multi-tree extension of the transition-based RRT: Application to ordering-and-pathfinding problems in continuous cost spaces, *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, 2014, pp. 2991-2996.
54. Vonásek V., Pěnička R. Space-filling forest for multi-goal path planning, *In Proc. 24th IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Factory Automat.*, 2019, pp. 1587-1590.
55. Jeong I.-B., Lee S.-J., Kim J.-H. Quick-RRT*: Triangular inequality-based implementation of RRT* with improved initial solution and convergence rate, *Expert Systems with Applications*, 2019, Vol. 123, pp. 82-90.
56. Yang K. Anytime synchronized-biased-greedy rapidly-exploring random tree path planning in two dimensional complex environments, *International Journal of Control, Autom. Syst.*, 2011, Vol. 9, No. 4, pp. 750.
57. Wang J., Chi W., Shao M., Meng M. Q.-H. Finding a high-quality initial solution for the RRTs algorithms in 2D environments, *Robotica*, 2019, Vol. 37, No. 10, pp. 1677-1694.
58. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions, *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
59. Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Pshikhopov V.Kh. Optimizatsiya dvizheniya mobil'nogo robota na ploskosti v pole konechnogo chisla istochnikov-repellerov [Optimization of the movement of a mobile robot on a plane in the field of a finite number of repeller sources], *Tr. ISP RAN [Proceedings of ISP RAS]*, 2020, Vol. 19 (1), pp. 43-78.
60. Kostyukov V., Medvedev M., Pshikhopov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field, *Informatics and Automation*, 2021, Vol. 20 (3), pp. 690-726.
61. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektor'nogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [Positional trajectory control system of a robotic aeronautical platform: mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control]*, 2013, No. 6, pp. 14-21.
62. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81 (11), pp. 2078-2093. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
63. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for the movement of a multicopter-type UAV system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.

64. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). The 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014*, pp. 8953-8958.
65. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez sistem upravleniya podvodnymi apparatami s nelineynymi kharakteristikami ispolnitel'nykh organov [Synthesis of control systems for underwater vehicles with nonlinear characteristics of executive bodies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2011, No. 3 (116), pp. 147-156.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., с.н.с. В.А. Шевченко.

Медведев Михаил Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Бросалин Дмитрий Олегович – e-mail: brosalin@sfedu.ru; инженер.

Гуренко Борис Викторович – e-mail: borisgurenko@sfedu.ru; к.т.н.; с.н.с.

Васильева Мария Александровна – Южный федеральный университет; e-mail: marv@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; магистрант.

Хамдан Низар – e-mail: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com; аспирант.

Medvedev Mikhail Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Brosalin Dmitry Olegovich – e-mail: brosalin@sfedu.ru; engineer.

Gurenko Boris Viktorovich – e-mail: borisgurenko@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Vasileva Maria Aleksandrovna – Southern Federal University; e-mail: marv@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; student.

Hamdan Nizar – e-mail: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com; post-graduate student.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-192-201

И.О. Шепель

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА КАРТЕ ЗАНЯТОСТИ С НАКОПЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ

Рассматривается проблема обнаружения динамических препятствий на карте занятости, полученной по данным системы технического зрения мобильной робототехнической платформы. Целью работы является качественное улучшение алгоритма обнаружения препятствий с помощью добавления фильтра частиц для выделения движущихся объектов по данным карты. В исследовании решается задача корректного накопления данных в карте занятости и уменьшения задержки обновления информации в ячейках карты, по которым двигаются динамические объекты. Представленная в статье модификация фильтра частиц способна корректно работать с динамическими препятствиями в широком диапазоне скоростей, устойчива к выбросам, вызванным в результате случайной генерации начальной скорости частиц, и предназначена для работы в реальных условиях в среде с большим количеством движущихся препятствий и в реальном масштабе времени. Разработана эвристика, которая уменьшает количество неправильных классификаций в окклюзированных зонах. Показано, что алгоритм обнаружения динамических объектов в

карте занятости инвариантен к типу сенсоров, используемых в системе технического зрения, а также описана реализация, объединенная с накапливаемой картой препятствий. Алгоритм реализован и протестирован на борту автономной робототехнической платформы и на открытом наборе данных. В статье приведено сравнение с другими подходами к обнаружению динамических препятствий, а также рассчитаны метрики быстродействия для всех анализируемых методов для вычислителей на базе GPU Nvidia RTX 3070 и GPU встроенного вычислителя Jetson AGX Xavier. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований по улучшению представленного подхода.

Карта занятости; лидар; облако точек; фильтр частиц; обнаружение препятствий; динамический объект; автономное движение.

I.O. Shepel

PARTICLE FILTER BASED DETECTION OF DYNAMIC OBJECTS ON AN ACCUMULATED OCCUPANCY MAP

The paper considers the problem of detecting dynamic obstacles on the accumulated occupancy map generated by the computer vision system of a mobile robot. The purpose of this research is to improve the quality of the obstacle detection algorithm by adding a particle filter to find moving objects from the map data. In the paper, the problem of correct accumulation of data in the occupancy map and reducing the delay in updating the map cells in which the object moves is solved. The modification of the particle filter presented in the paper is able to work correctly with dynamic obstacles in a wide range of speeds; it is resistant to outliers caused by random generation of the initial particles velocities, and is workable under real conditions in real time in an environment with a lot of moving objects. A heuristic has been created that reduces the number of misclassifications in occluded areas. It is shown that the algorithm for detecting dynamic objects in the map is invariant to the type of sensors used in the vision system, and an implementation combined with an accumulated occupancy map is described. The algorithm is implemented and tested on board an autonomous mobile robot, as well as on an open dataset. The article also provides a comparison with other approaches of dynamic obstacles detection, as well as calculated performance metrics for all analyzed methods for computers based on the GPU Nvidia RTX 3070 and Jetson AGX Xavier. Promising directions for further research to improve the presented algorithm are formulated.

Occupancy map; lidar; point cloud; particle filter; obstacle detection; dynamic object; autonomous movement.

Введение. В настоящее время активно развиваются и используются сервисные автономные робототехнические платформы (РТП) на базе небольших шасси, которые должны быть способны к безаварийному движению в пешеходных зонах с большим количеством движущихся объектов, например для решения задачи доставки последней мили или уборки улиц. Как правило, в подобных РТП используется классический подход к определению степени проходимости окружающей среды — построения карт занятости. Эти карты должны быть способны, во-первых, накапливать и уточнять информацию о препятствиях, а во-вторых, обновлять информацию о местоположении наиболее опасных динамических объектов с минимальными задержками. Наиболее распространенные подходы к обнаружению динамики либо ориентированы на применение на беспилотных автомобилях с другим доменом целевых данных, либо требуют больших вычислительных ресурсов, использование которых невозможно на небольших и экономичных сервисных РТП. Кроме того, пешеходные зоны характеризуются большой плотностью и разнородностью движущихся объектов (дети, велосипеды, самокаты, животные), хаотичным характером движения и отсутствием разметки, что увеличивает сложность задачи обнаружения динамических объектов.

В работе рассматривается задача построения карты проходимости на борту автономной РТП в среде с большим количеством динамических объектов для обеспечения безаварийного движения при выполнении задач уборки территории и

курьерской доставки. Используемый подход позволяет нивелировать задержки в обновлении статуса ячеек с движущимися препятствиями в накапливаемой карте проходимости, что позволяет оперативно реагировать на изменение их позиции и в дальнейшем корректировать собственную траекторию движения РТП.

В статье описана модификация алгоритма построения накапливаемой карты занятости по облаку точек с использованием фильтра частиц. Ключевые отличия разработанного алгоритма следующие:

- ◆ реализованный алгоритм работоспособен в реальном масштабе времени на встраиваемых вычислительных блоках;
- ◆ разработана эвристика, повышающая устойчивость алгоритма к ложным детекциям динамических ячеек;
- ◆ разработана эвристика, уменьшающая влияние окклюдированных зон на ложные детекции динамических препятствий;
- ◆ разработанный алгоритм имплементирован в алгоритм построения накапливаемых карт, что позволяет обнаруживать динамические объекты по нескольким различным источникам сенсорных данных.

Обзор существующих методов. Карта занятости [1] является одним из самых распространенных методов для построения модели проходимости и решения задачи беспилотного движения РТП. При этом большинство подходов не решает задачу выделения и отдельной обработки ячеек движущихся препятствий. Для обнаружения динамики, как показывают открытые конкурсы [2, 3], наиболее успешными являются нейросетевые подходы [4, 5]. Такие методы требуют высокопроизводительных вычислителей и больших наборов данных нужного домена, что является проблемой при разработке системы обнаружения препятствий в сервисных РТП. Планировать траекторию по таким данным без дополнительной картографической информации нельзя, но в работе [6] показана принципиальная возможность комплексировать такие данные с картами проходимости. Другой подход к выделению потенциальных динамических препятствий также использует нейросетевые модели, но для решения задачи семантической сегментации, как показано в [7]. При этом, хотя такой подход реализуем как на данных от стереокамер [8, 9], так и на облаках точек от лидара [10, 11], его использование не на беспилотных автомобилях затруднительно из-за отсутствия открытых наборов данных для обучения. Кроме того, вышеперечисленные методы существенно увеличивают время обнаружения объектов в связи с использованием тяжелых моделей. Другое семейство алгоритмов для обнаружения динамики также использует сверточные сети, но в качестве входа подаются классические карты занятости [12, 13]. Для обнаружения и предсказания движения используются рекуррентные сети, но такие модели очень чувствительны к параметрам карты занятости, что затрудняет обучение модели, применимой в реальных условиях. Наиболее универсальными являются подходы, не использующие нейронные сети, в частности базирующиеся на алгоритме фильтрации частиц [14, 15]. Поскольку частицы в них генерируются случайным образом, то точность обнаружения напрямую зависит от количества этих частиц, а значит и от производительности вычислителя, но существуют параллельные реализации, решающие эту проблему [16].

Алгоритм обнаружения динамики на накапливаемой карте занятости. В работе рассматривается проблема выделения движущихся объектов на карте занятости, сгенерированной по данным от лидара. Представленный алгоритм является развитием работ автора по комплексированию данных системы технического зрения РТП и обнаружению динамики [6, 7] и построению карты проходимости от нескольких сенсоров [17]. В качестве базовой реализации алгоритма фильтрации частиц был выбран метод из [16]. В нем можно выделить следующие шаги:

1. Предсказание положения частиц.
2. Распределение частиц по ячейкам.
3. Расчет обновленной вероятности занятости ячеек.
4. Обновление весов частиц с предыдущего шага.
5. Инициализация новых частиц.
6. Вычисление среднего и дисперсии двухмерной скорости частиц.
7. Повторная выборка и отсеивание частиц.
8. Выделение динамических ячеек карты по ранее найденным метрикам.

Предсказание положения и распределение частиц. Частицы представляют собой вектор вида $p = (x, y, v_x, v_y)$, при этом их модель движения считается линейной. На шаге предсказания частицы перемещаются по карте в соответствии со своими скоростями, а затем проецируются в ячейки карты. Вес сохранившихся с предыдущего шага частиц обновляется по формуле (1):

$$\omega^{i,p} = p_S \cdot \omega^i, \quad (1)$$

где p_S – гиперпараметр алгоритма, описывающий вероятность «выживания» частицы.

Расчет обновленной вероятности занятости ячеек. На этом шаге рассчитываются массы гипотез «ячейка занята» $m^{i,p}(O^{i+1})$ и «ячейка свободна» $m^{i,p}(F^{i+1})$:

$$\begin{aligned} m^{i,p}(O^{i+1}) &= \sum_{k=1}^{K_P} \omega_k^{i,p}, \\ m^{i,p}(F^{i+1}) &= \min[m^i(F^i), 1 - m^{i,p}(O^{i+1})], \end{aligned} \quad (2)$$

где K_P – число частиц в ячейке. Формулы (2) используются для вычисления присоединенной массы по правилу комбинации Демпстера-Шафера [18] (3):

$$m^{i+1}(O^{i+1}) = m^{i,p}(O^{i+1}) \oplus m^i(O^{i+1}|z^{i+1}). \quad (3)$$

Масса $m^i(O^{i+1}|z^{i+1})$ получена с моментальной карты измерений, как это показано в [17]. Аналогичная формула используется и для свободных ячеек. Суммарная масса частиц в ячейке на каждой итерации состоит из «выживших» и «рожденных» частиц. Эти массы представимы в виде (4):

$$\begin{aligned} \rho^{i+1,b} &= \frac{m^{i+1}(O^{i+1}) \cdot p_B [1 - m^{i,p}(O^{i+1})]}{m^{i+1}(O^{i+1}) - p_B [1 - m^{i,p}(O^{i+1})]}, \\ \rho^{i+1,p} &= m^{i+1}(O^{i+1}) - \rho^{i+1,b}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\rho^{i+1,b}$ и $\rho^{i+1,p}$ – массы «рожденных» и «выживших» частиц соответственно, а p_B – задаваемая вероятность рождения частицы.

Обновление весов «выживших» частиц. В общем случае частицы ассоциируются с ячейкой лишь с определенной вероятностью, что моделирует ошибку сенсора. Тогда вес обновленных частиц ω^{i+1} будет выражаться формулой (5):

$$\omega^{i+1} = g^{i+1}(z^{i+1}) \cdot \omega^{i,p}, \quad (5)$$

где $g^{i+1}(z^{i+1})$ – функция правдоподобия измерения сенсора от существования в ячейке частицы. После этого веса в каждой ячейке нормализуются.

Инициализация новых частиц. Затем производится засевание новых частиц. При этом для того, чтобы реализация алгоритма работала в реальном времени, как количество новых частиц на каждой итерации, так и общее количество частиц постоянно. Веса «рожденных» частиц рассчитываются по формуле (6):

$$\omega^{i+1,B} = \frac{p_A^{i+1} \cdot \rho^{i+1,b}}{K_A}, \quad (6)$$

где p_A^{i+1} – вероятность ассоциирования новых частиц (в простейшем случае задается константой), а K_A – количество таких частиц в ячейке.

Вычисление среднего и дисперсии. Для предсказания положения частиц, а также для классификации ячеек вычисляется среднее, дисперсия и ковариация скоростей частиц (7):

$$\begin{aligned}\bar{v}_x &\approx \frac{1}{\rho^{i+1,p}} \sum_{k=1}^{K_p} \omega_k^{i+1} \cdot v_{x,k}^{i+1}, \\ \sigma_{v_x}^2 &\approx \frac{1}{\rho^{i+1,p}} \sum_{k=1}^{K_p} \omega_k^{i+1} \cdot (v_{x,k}^{i+1})^2 - \bar{v}_x^2, \\ cov(v_x, v_y) &\approx \frac{1}{\rho^{i+1,p}} \sum_{k=1}^{K_p} \omega_k^{i+1} \cdot v_{x,k}^{i+1} \cdot v_{y,k}^{i+1} - \bar{v}_x \cdot \bar{v}_y.\end{aligned}\quad (7)$$

Аналогичные формулы справедливы и для y компонент векторов скоростей частиц.

Перевыборка частиц. Отсевание как предсказанных с предыдущей, так и сгенерированных на текущей итерации частиц производится полиномиальным методом [19]. При этом чем больше вес частицы, тем больше у нее вероятность быть выбранной для следующей итерации алгоритма, а так как отсеивание имеет стохастический характер, то каждая ячейка может быть выбрана как 0, так и N раз, где N – общее количество частиц, гиперпараметр алгоритма.

Выделение динамики. Затем для разделения динамических и статических ячеек карты с пороговым значением τ_m сравнивается расстояние Махаланобиса (8):

$$m = \vec{v}_{(x,y)} \begin{pmatrix} \sigma_{v_x}^2 & cov(v_x, v_y) \\ cov(v_x, v_y) & \sigma_{v_y}^2 \end{pmatrix}^{-1} \vec{v}_{(x,y)}^T. \quad (8)$$

Также отметим, что вычисления по формулам (1–7) могут вычисляться по массивам частиц и ячеек параллельно и независимо друг от друга.

Метод [16] обладает рядом недостатков: во-первых, не учитывается собственное движение РТП между итерациями по построению карты. Во-вторых, максимальный модуль скорости частицы V_{max} при засеивании – гиперпараметр алгоритма. Слишком низкое значение ограничит возможность детектировать объекты с высокой скоростью, а высокое – увеличит количество ложных детекций (см. рис. 1). Наконец, при движении в реальных условиях на моментальной карте неизбежно будут возникать окклюдируемые зоны, вызванные перекрытием поля зрения сенсора. Ячейки этих зон моментальной карты не будут засеиваться частицами, а значит будут создавать эффект движения на препятствиях с большими габаритами (см. рис. 2).

Компенсация собственного движения. Для учета собственного движения перед каждой итерацией фильтра выполняется смещение частиц в сторону, противоположную движению карты, при этом у всех частиц, вышедших за пределы карты, обнуляется вес, и они отсеиваются на этой итерации. Как правило, позицию и ориентацию платформы можно получить от инерциальной навигационной системы, однако в этом случае необходимо учесть асинхронность между получением кадров от датчиков системы технического зрения и данных одометрии, поскольку точность фильтра частиц сильно зависит от точности компенсации движения. В случае неправильного смещения, что особенно заметно на картах с небольшим размером дискрета, частицы динамических препятствий могут попадать на свободные или ячейки со статическими препятствиями, что в свою очередь приведет к потере движущегося объекта.

Фильтрация ложных детекций. Ошибочная классификация динамических ячеек характеризуется двумя свойствами: во-первых, неправильный расчет скорости происходит из-за превосходящего суммарного веса частиц, «рожденных» на текущей итерации, которые еще не успели отфильтроваться. Во-вторых, подобные выбросы одиночны. Поэтому дополнительно к сравнению с (8) те ячейки, суммарная масса «рожденных» частиц которых больше задаваемого порога и у которых в соседних ячейках нет динамических препятствий, считаются выбросами и отбрашиваются. Результат применения такого фильтра показан на рис. 1.

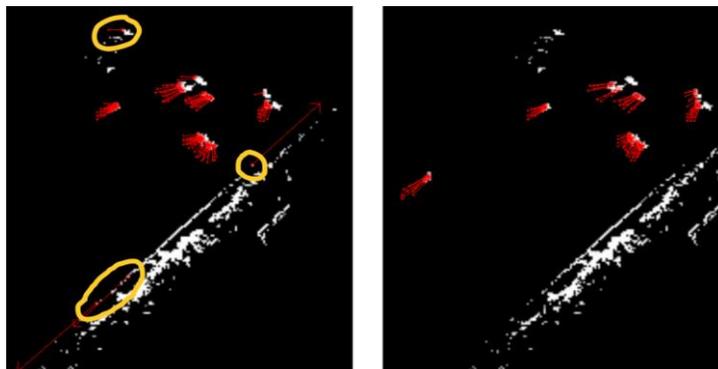


Рис. 1. Ложная классификация ячеек (скорости показаны красным) протяженного препятствия (слева) и результат фильтрации (справа)

Для уменьшения количества ложных детекций в окклюдированных зонах на вход фильтру частиц подается моментальная карта, дополненная ячейками статических препятствий накапливаемой карты занятости с предыдущей итерации алгоритма. Карта занятости по одному и тому же кадру до и после применения такой эвристики показана на рис. 2.

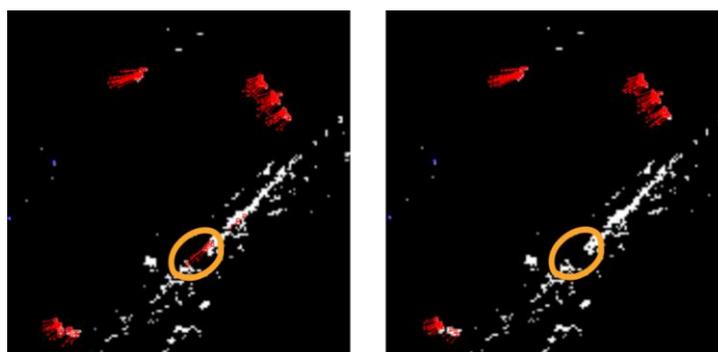


Рис. 2. Ложные детекции в окклюдированной зоне без объединения с накапливаемой картой (слева) и результат объединения (справа)

Наконец, облако точек, а следовательно и проекции на карту реальных динамических объектов в процессе движения не остаются статичными, что наиболее сильно сказывается на картах с высоким разрешением. Это связано как с изменением геометрии объектов (движение ног и рук пешеходов), так и с изменением точки обзора на объекты с постоянной геометрией. Все подобные изменения проекции динамических объектов будут помечаться как статические препятствия, поскольку в них не будут попадать частицы, сохранившиеся с предыдущих итераций. Для устранения этого эффекта использовался алгоритм связных компонент. На моментальной карте с его помощью находились группы ячеек-препятствий, затем, если среди этой группы обнаруживались динамические ячейки, к ним применялась операция дилатации до тех пор, пока не будут помечены все ячейки группы, либо радиус расширения не достигнет максимально возможного. На рис. 3 показана накапливаемая карта препятствий, полученная по алгоритму [17], и результат работы предлагаемого подхода по обнаружению динамических препятствий.

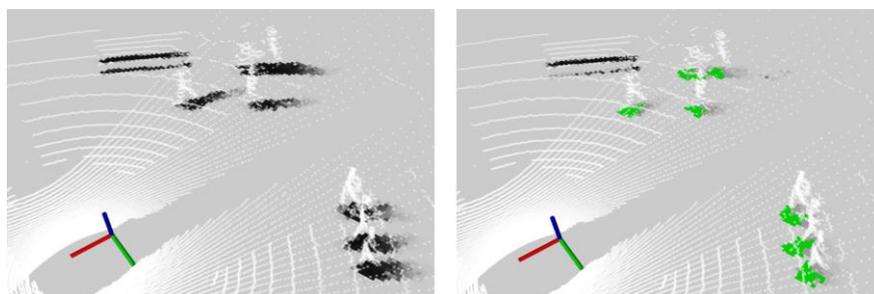


Рис. 3. Пешеходы на накапливаемой карте занятости без (слева) и с использованием (справа) фильтра частиц. Черным показаны статические препятствия, зеленым – динамические, серым – свободные ячейки

Поскольку фильтр частиц принимает на вход моментальные карты занятости и объединен с алгоритмом построения накапливаемой карты, то описанный подход к обнаружению динамических препятствий инвариантен к типу используемых сенсоров.

Экспериментальные результаты. Алгоритм был реализован на ядрах графического процессора с использованием языка CUDA. Быстродействие этой реализации замерялось на платформе Jetson AGX Xavier (запущенной в режиме энергопотребления MAXN) и на десктопном компьютере с процессором Intel i7-9700KF и видеокартой RTX 3070 на открытом наборе данных Waymo [20]. Также быстродействие программной реализации сравнивалось с подходами, описанными в работах [6, 7]. Результаты вычислительных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Быстродействие компонент алгоритма

	Подход [6]		Подход [7]		Предложенный подход	
	Desktop	Xavier	Desktop	Xavier	Desktop	Xavier
Детекция [6], мс	37	108	-	-	-	-
Сегментация [7], мс	-	-	39	77	-	-
Фильтр частиц, мс	-	-	-	-	20	30
Карты занятости, мс	15	20	33	64	21	57
Суммарное время, мс	52	128	72	141	41	87

Кроме того, описанные алгоритмы были протестированы в реальных условиях на сервисных РТП: уборщике и курьере (см. рис 4). На обеих платформах использовались лидары Ouster, инерциальные спутниковые системы Xsens MTi-680G и вычислительные блоки на базе Nvidia Jetson AGX Xavier. В табл. 2 указаны гиперпараметры фильтра частиц, использованные во всех проведенных экспериментах.

Таблица 2

Экспериментальные параметры алгоритма

Параметр	Значение	Параметр	Значение
N	80000	p_B	0,02
p_S	0,98	τ_m	6,0
p_A	1	V_{max} , м/с	20



Рис. 4. Робот-уборщик (слева) и робот-курьер (справа)

Выводы и будущая работа. В статье представлен улучшенный алгоритм построения карты занятости, в котором благодаря фильтру частиц происходит обнаружение динамических препятствий. Предложены несколько эвристик, уменьшающие количество ложных срабатываний и шумов и позволяющие использовать меньшее количество частиц и, следовательно, вычислительного времени, чем в оригинальной статье [16]. Разработанные модификации улучшают качество работы фильтра частиц и протестированы в реальных условиях и в среде с активным движением динамических объектов, что критически важно для сервисных роботов. Программная реализация метода обладает более высоким быстродействием, чем другие рассмотренные подходы к выделению динамики, и способна работать в реальном масштабе времени на встраиваемых платформах.

Существует несколько направлений дальнейшего развития описанного метода. Во-первых, необходимо разработать алгоритм комплексирования и синхронизации информации от моментальных карт с учетом используемого сенсора и временной асинхронности данных. Так облака точек от радара содержат информацию об относительной скорости объектов, которую можно использовать для более точной инициализации ячеек, а карты по данным стереокамеры могут содержать семантическую информацию о классе объекта, что также можно использовать при инициализации частиц. Во-вторых, алгоритм связных компонент, который объединяет отдельные ячейки в объекты, можно использовать для уточнения и предсказания траектории препятствий.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Elfes A.* Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation // Computer. – 1989. – Vol. 22, No. 6. – P. 46-57.
2. *Geiger A., Lenz P., Urtasun R.* Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2012. – P. 3354-3361.
3. *Caesar H. et al.* nuscenes: A multimodal dataset for autonomous driving // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – P. 11621-11631.
4. *Shi S., Wang X., Li H.* pointcnn: 3d object proposal generation and detection from point cloud // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – P. 770-779.
5. *Yin T., Zhou X., Krahenbuhl P.* Center-based 3d object detection and tracking // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2021. – P. 11784-11793.
6. *Шепель И.О.* Алгоритм комплексирования нескольких источников данных в общую карту занятости // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3 (220). – С. 64-71.
7. *Shepel I. et al.* Occupancy Grid Generation With Dynamic Obstacle Segmentation in Stereo Images // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021.

8. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2015. – P. 3431-3440.
9. Eppenberger T. et al. Leveraging stereo-camera data for real-time dynamic obstacle detection and tracking // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2020. – P. 10528-10535.
10. Cortinhal T., Tzelepis G., Erdal Aksoy E. SalsaNext: Fast, uncertainty-aware semantic segmentation of LiDAR point clouds // International Symposium on Visual Computing. – Springer, Cham, 2020. – P. 207-222.
11. Xu J. et al. Rpvnet: A deep and efficient range-point-voxel fusion network for lidar point cloud segmentation // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2021. – P. 16024-16033.
12. Mohajerin N., Rohani M. Multi-step prediction of occupancy grid maps with recurrent neural networks // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – P. 10600-10608.
13. Schreiber M., Hoermann S., Dietmayer K. Long-term occupancy grid prediction using recurrent neural networks // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2019. – P. 9299-9305.
14. Danescu R., Nedevschi S. A Particle-Based Solution for Modeling and Tracking Dynamic Digital Elevation Maps // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2014. – Vol. 3, No. 15. – P. 1002-1015.
15. Tanzmeister G. et al. Grid-based mapping and tracking in dynamic environments using a uniform evidential environment representation // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2014. – P. 6090-6095.
16. Nuss D. et al. A random finite set approach for dynamic occupancy grid maps with real-time application // The International Journal of Robotics Research. – 2018. – Vol. 37, No. 8. – P. 841-866.
17. Шенель И.О. Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33, № 2.
18. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping // Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 57-72.
19. Li T., Bolic M., Djuric P.M. Resampling methods for particle filtering: classification, implementation, and strategies // IEEE Signal processing magazine. – 2015. – Vol. 32, No. 3. – P. 70-86.
20. Sun P. et al. Scalability in perception for autonomous driving: Waymo open dataset // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – P. 2446-2454.

REFERENCES

1. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, 1989, Vol. 22, No. 6, pp. 46-57.
2. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2012, pp. 3354-3361.
3. Caesar H. et al. nuscenes: A multimodal dataset for autonomous driving, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020, pp. 11621-11631.
4. Shi S., Wang X., Li H. pointcnn: 3d object proposal generation and detection from point cloud, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 770-779.
5. Yin T., Zhou X., Krahenbuhl P. Center-based 3d object detection and tracking, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2021, pp. 11784-11793.
6. Shepel' I.O. Algorithm kompleksirovaniya neskol'kikh istochnikov dannykh v obshchuyu kartu zanyatosti [Algorithm for combining multiple data sources into a common employment map], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220), pp. 64-71.
7. Shepel I. et al. Occupancy Grid Generation With Dynamic Obstacle Segmentation in Stereo Images, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.

8. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 3431-3440.
9. Eppenberger T. et al. Leveraging stereo-camera data for real-time dynamic obstacle detection and tracking, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020, pp. 10528-10535.
10. Cortinhal T., Tzelepis G., Erdal Aksoy E. SalsaNext: Fast, uncertainty-aware semantic segmentation of LiDAR point clouds, *International Symposium on Visual Computing*. Springer, Cham, 2020, pp. 207-222.
11. Xu J. et al. Rpvnet: A deep and efficient range-point-voxel fusion network for lidar point cloud segmentation, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 16024-16033.
12. Mohajerin N., Rohani M. Multi-step prediction of occupancy grid maps with recurrent neural networks, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 10600-10608.
13. Schreiber M., Hoermann S., Dietmayer K. Long-term occupancy grid prediction using recurrent neural networks, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 9299-9305.
14. Danescu R., Nedeveschi S. A Particle-Based Solution for Modeling and Tracking Dynamic Digital Elevation Maps, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, Vol. 3, No. 15, pp. 1002-1015.
15. Tanzmeister G. et al. Grid-based mapping and tracking in dynamic environments using a uniform evidential environment representation, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014, pp. 6090-6095.
16. Nuss D. et al. A random finite set approach for dynamic occupancy grid maps with real-time application, *The International Journal of Robotics Research*, 2018, Vol. 37, No. 8, pp. 841-866.
17. Shepel' I.O. Modifitsirovannyi algoritm postroeniya karty zanyatosti po oblaku tochek ot neskol'kikh lidarov [A modified algorithm for constructing an employment map based on a cloud of points from several lidars], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and Systems], 2020, Vol. 33, No. 2.
18. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping, *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 57-72.
19. Li T., Bolic M., Djuric P.M. Resampling methods for particle filtering: classification, implementation, and strategies, *IEEE Signal processing magazine*, 2015, Vol. 32, No. 3, pp. 70-86.
20. Sun P. et al. Scalability in perception for autonomous driving: Waymo open dataset, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020, pp. 2446-2454.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Шепель Илья Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: chepsiilya@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79085180350; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; аспирант.

Shepel Ilya Olegovich – Southern Federal University; e-mail: chepsiilya@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79085180350; the department of mathematical support and computer applications; post-graduate.

Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер, И.И. Турулин

МЕТОДИКА УМЕНЬШЕНИЯ ВЫБРОСА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ЦИФРОВОМ ФИЛЬТРЕ НИЖНИХ ЧАСТОТ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ СРЕЗА

Цифровая обработка сигналов широко применяется в современной технике, в том числе в робототехнике, медицинской технике и т.д. Так, управляемые цифровые фильтры используются для устранения постоянной составляющей выходного сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя. Это также снижает уровень низкочастотных помех, разбросанных по оси частот слева от нижней границы спектра сигнала. В реальных ситуациях сигналы подвержены разнообразным помехам и шумам; однако применение фильтра может подавить эти шумы и произвести чистый сигнал. Под управляемостью понимается явная зависимость коэффициентов фильтра от частоты среза. В цифровом фильтре может возникнуть переходный процесс, на который указывает выброс сигнала. Изменение частоты среза во время операции фильтрации может вызвать это переходное событие. В этом отчете фильтр LPF Баттерворта используется, чтобы предложить стратегию компенсации для уменьшения этого выброса. Переходный процесс – это выброс (драйв) на временной диаграмме результатов. Этот драйв является последствием подстройки коэффициентов (границ) фильтра в процессе фильтрации (это классифицируется как «настройка на лету»). С помощью программы MATLAB исследовался переходный процесс, возникающий в результате перестройки фильтра, и проверялись формулы компенсации этого переходного процесса. Установлено, что применение такой компенсации снижает негативные последствия переходного процесса. Это уменьшение зависит от порядка фильтра, коэффициента настройки (соотношение частот среза до и после настройки) и момента настройки (для периодического сигнала).

Цифровой фильтр; Баттерворт; управляемый; компенсация; переходный процесс; выброс; частота среза; фильтрация.

Al-Karawi Hussein Shakor Mogheer, I.I. Turulin

REDUCTION APPROACH OF TRANSIENT PROCESS OVERSHOOT IN CONTROLLED TUNABLE LOW PASS DIGITAL FILTER

Digital signal processing is widely used in modern technology, including robotics, medical technology, etc. Thus, the controlled digital filters are used to eliminate the constant component of the output signal at the output of an analog-to-digital converter. This also reduces the low-frequency interference level spread out on the frequency axis to the left of the lower boundary of the signal spectrum. In actual situations, signals are subjected to a variety of disruptions and noises; however, applying a filter may suppress these noises and produce a clean signal. Controllability means the explicit dependence of the filter coefficients on the cutoff frequency. A transient occurrence can arise in a digital filter, which is indicated in the overshoot of the signal. A change in the cutoff frequency during filtering operation could cause this transient event. In this report, a Butterworth LPF filter is used to offer a compensation strategy for reducing this overshoot. A transient is an overshoot (drive) in the result timing chart. This drive is an after effect of the adjustment of the coefficients (boundaries) of the filter during filtering (this is classified "on-the-fly tuning"). By using the MATLAB program, the transient process resulting from the restructuring of the filter was investigated and the formulas were checked compensation of this transient process. It was found that the application of such compensation reduced the negative effects of the transition process. This decrease depends on the order of the filter, the adjustment coefficient (the ratio of cut frequencies before and after adjustment) and the moment of adjustment (for the periodic signal).

Digital filter; Butterworth; controlled; compensation; transient process; overshoot; cutoff frequency; filtering.

Введение. Фильтры являются наиболее важными и влиятельными элементами в рамках сигналов и систем, поскольку они практически представлены для фильтрации желаемого сигнала в соответствии с предпосылкой, подлежащей управлению в различных областях, представляющих интерес. Переходот речи через изображение к обработке видео и аудио являются основными техническими областями, в которых обычно используются настраиваемые цифровые фильтры [1–3]. Фильтры служат различным целям при сборе и анализе данных; такие приложения включают регулировку частоты временного сигнала путем уменьшения\увеличения некоторых частот[4-5]. В обработке сигналов фильтр представляет собой частотное селективное устройство или схему, предназначенную для пропускания сигналов с заданными частотами и отклонения или ослабления сигналов с нежелательными частотами [6]. В другом значении ограничить частотный спектр сигнала некоторой заданной полосой частот [7–10].

Свойствами, описывающими фильтр, являются его тип (LPF, HPF, BPF, BSF), частота среза (частота, выше которой фильтр не будет пропускать сигнал) и порядок (количество коэффициентов фильтра, которые будут непосредственно влиять на наклон переходной полосы) [11].

Управляемые цифровыетипы фильтр могут быть реализованы с двумя классификациями: конечный импульсный отклик (КИХ) и бесконечная импульсная характеристика (БИХ). «Импульсный отклик» как термин относится к фильтрам, которые работают во временной области. Таким образом, КИХ является фильтром, импульсный отклик которого является конечным периодом, потому что он обнуляется за конечное время, но БИХ-фильтр имеет внутреннюю обратную связь и всегда отвечает бесконечно [12–13].

Основным преимуществом БИХ фильтров перед фильтрами КИХ-фильтр является их эффективная реализация, которая помогает им соответствовать спецификациям полосы пропускания, стоп-полосы, пульсаций и / или отката. Для этого нам нужен фильтр БИХ низкого порядка по сравнению с аналогичным фильтром КИХ-фильтр. Это фактически соответствует меньшему количеству требуемых вычислений. Лучше всего использовать БИХ фильтр, когда линейность и крапы низкого порядка не являются проблемой. Основными недостатками БИХ являются нестабильность, обратная связь, нелинейность и конечный период [8].

С другой стороны, КИХ-фильтр всегда может оказывать линейное поведение, он не требует обратной связи, его природа неподвижна, он легко может быть спроектирован для удовлетворения определенной частотной характеристики и не имеет конечного периода. Недостатком КИХ-фильтр является то, что они требуют больше памяти и вычислительной мощности, чем фильтры БИХ сопоставимой резкости или селективности, особенно при крапах низкого порядка [14–16].

Существует несколько прототипов (методов) для фильтров БИХ и КИХ, которые выбраны в соответствии с конкретным применением. На рис. 1 показан подход к фильтру с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр). Мы видим следующее: В методе Чебышева у нас наименьшее количество ряби в стоп-полосе, однако у нас самая широкая переходная полоса. Переходная область метода Хэмминга узкая, а рябь меньше, чем у метода Ханнинга. Метод Кайзера имеет более низкую амплитуду пульсации в области остановки. Самая узкая переходная полоса была обнаружена в методе Ханнинга, с другой стороны, она имеет большую пульсацию стоп-полосы. Прямоугольный метод имеет наибольшее количество пульсаций/лепестков и даже влияет на полосу пропускания [17–20].

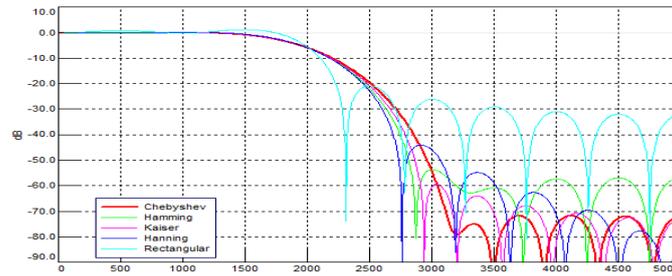


Рис. 1. Методы для КИХ-фильтров

На рис. 2 сравниваются фильтры нижних частот БИХ-фильтродинакового порядка и частоты среза. Из этого рисунка мы видим, что метод Баттерворта имеет плоскую реакцию как в полосе пропускания, так и в полосе остановок, но широкую переходную область. Обратный метод Чебышева по сравнению с фильтром Баттерворта имеет плоскостность в полосе пропускания и меньшую ширину перехода, но рябь в стоп-полосе. Если пульсация в стоп-полосе не вызывает проблем, фильтр Баттерворта должен использоваться для определенного применения [20–23]. Метод Чебышева продуцирует рябь в полосе пропускания. По сравнению с обратным Чебышева, он имеет более крутой откат. Метод “Causer” имеет самую узкую ширину перехода и имеет пульсации в стоп-полосе и полосе пропускания. Именно поэтому он называется эллиптическим фильтром. Метод Бесселя имеет наклонную величину как в полосе пропускания, так и в полосе остановок, с очень широкой переходной областью. Задержка по отношению к частоте в фильтре является самой плоской среди других упомянутых методов [24–26].

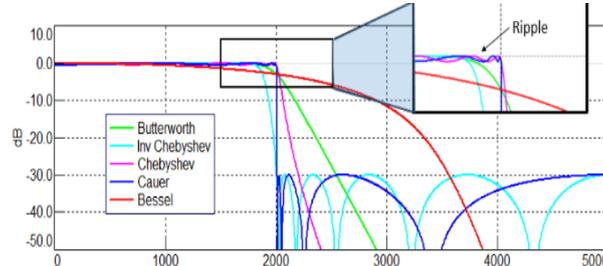


Рис. 2. Сравнение низкочастотных фильтров БИХ с одинаковым порядком и частотой среза

Постановка задачи. Вокруг у нас есть входной сигнал, который мы хотим отфильтровать, чтобы получить идеальный выход, а затем вычесть этот идеальный сигнал из реального сигнала. В результате вычитания возникнет переходный процесс и на его выходе произойдет превышение. Это отрицательный фактор, который представлен переходным процессом, возникающим в момент регулировки фильтра (резкое изменение его коэффициентов). Таким образом, возникает проблема преходящей компенсации.

Этапы работы. В этой статье мы предпримем следующие шаги для решения проблемы превышения:

1. Проектирование фильтра для входного сигнала на определенной частоте среза с использованием фильтра LPF n -го порядка и получение выходного сигнала для всей временной области

2. Спроектируйте второй фильтр на другой частоте среза и получите идеальный сигнал на выходе.
3. Вычтите идеальный сигнал из реального сигнала для получения переходного сигнала.
4. Повторите процесс для разных частот среза.
5. Компенсируйте транзитный процесс, который произошел, когда мы изменили коэффициенты фильтра, чтобы они представляли различные частоты среза.

Метод проектирования фильтров и рассмотрение параметров. В этой статье мы используем фильтр нижних частот, выбирается 5-й порядок Баттерворта, 5 - й порядок, а выход этого фильтра можно описать следующим образом:

$$y_{n+i} = \sum_{k=0}^M a_k x_{(n+i)-k} + \sum_{k=1}^N b_k y_{(n+i)-k}, \quad (1)$$

где: y – выходной сигнал, x – входной сигнал, а и b – коэффициенты фильтрации. Конфигурация цифрового фильтра по уравнению (1) показана на рис. 3.

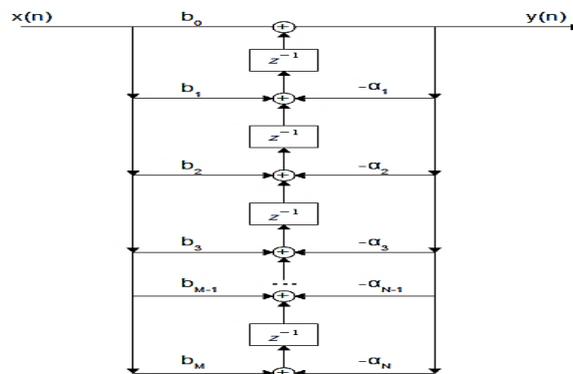


Рис. 3. Структура цифрового фильтра БИХ

Спецификации входного сигнала. Входной сигнал представляет собой синусоидальный сигнал со следующими параметрами, как показано на рис. 4: Амплитуда = 1, Частота = 55 Гц и Время дискретизации = 1/600.

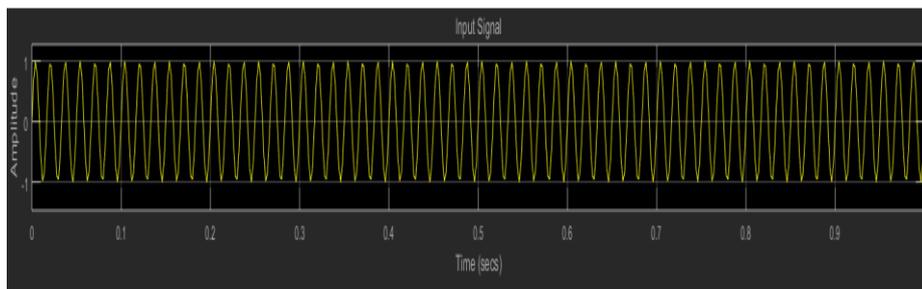


Рис. 4. Входной сигнал

Получение идеального сигнала. Путем подачи синусоидального сигнала на вход указанного цифрового фильтра ИИР с частотой среза 2 кГц. Затем входной сигнал скважины вводится и синхронизированными им один за другим к 3 другим фильтрам того же типа фильтров с частотами среза 2,5, 3,2, 3,5 кГц соответственно. MATLAB Simulink для реализованного фильтра представлен на рис. 5. На рис. 6 показана конфигурация получения идеального сигнала с помощью MATLAB Simulink.

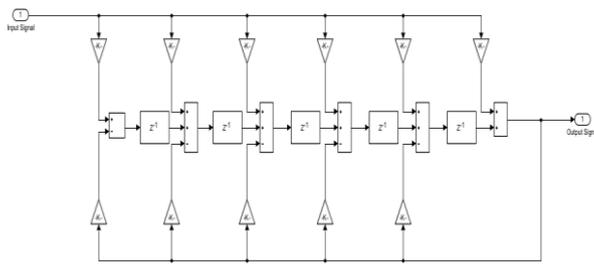


Рис. 5. Реализована блок-схема фильтра Simulink

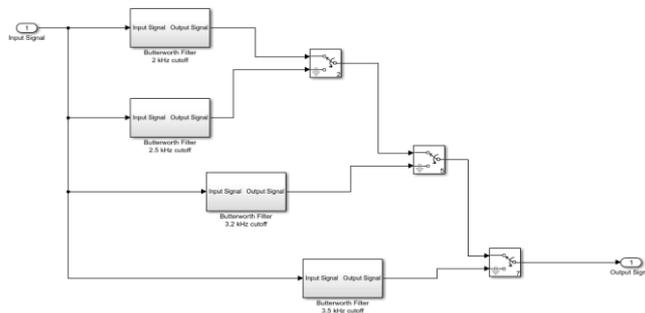


Рис. 6. Получение идеального сигнала с помощью MATLAB Simulink

MATLAB дает коэффициенты фильтрации, определяя тип фильтра, порядок и частоту среза. Табл. 1 объясняют коэффициенты, которые используются для различных частот среза. Также полученный идеальный сигнал показан на рис. 7.

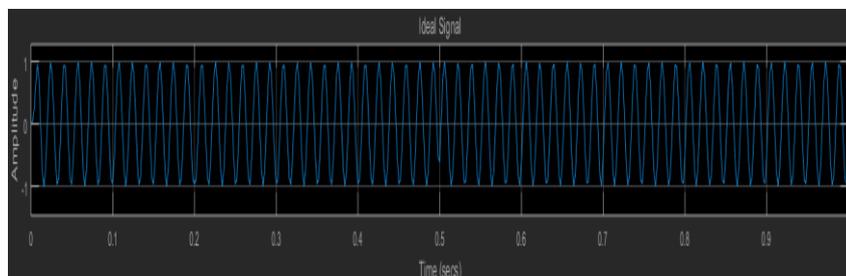


Рис. 7. Идеальный сигнал

Таблица 1

Коэффициенты фильтра для различных частот среза

Частота среза	Коэффициенты						
		1	2	3	4	5	6
2 kHz	a	0.03277	0.15292	0.31686	0.31586	0.15292	0.03267
	b	0	0.52232	0	0.03361	0	-
2.5 kHz	a	0.03277	0.26393	0.52786	0.52786	0.26393	0.05278
	b	0	0.63343	0	0.05572	0	-
3.2 kHz	a	0.1018	1.0083	1.0178	1.0178	0.0093	0.1018
	b	1.8648	1.0024	1.1015	0.2165	0.0306	-
3.5 kHz	a	0.1733	1.3210	2.7328	2.7328	1.3120	0.2733
	b	1.4634	2.8838	1.7506	0.5001	0.0607	-

Получение реального сигнала и метод снижения превышения. Превышение происходит при изменении частоты, например, через фильтрацию. Полоса перехода фильтра является частью амплитудно-частотной характеристики между границей полосы пропускания и границей барьерной полосы. Переходный процесс представляет собой превышение (импульс) на временной диаграмме выходного сигнала, как показано на рис. 10. Этот импульс является следствием изменения коэффициентов (параметров) фильтра во время фильтрации (это называется «регулировка на лету») [14]. Кроме того, этот реальный сигнал, где мы можем четко видеть превышение, представлен на рис. 8.

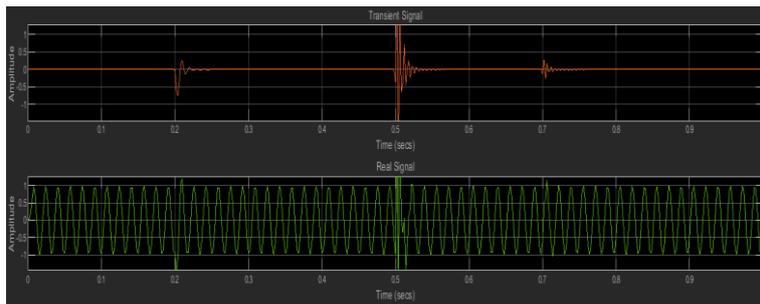


Рис. 8. Реальные и переходные сигналы без компенсационного процесса

Поскольку цифровой фильтр может быть сформулирован как линейное разностное уравнение (1), каждое приращение коэффициентов вызывает скачок при регулировке фильтра. Чтобы скорректировать превышение и добиться чистого реального сигнала, вычтите идеальный сигнал из реального сигнала и добавьте результат на выход фильтра, как показано на рис. 9.

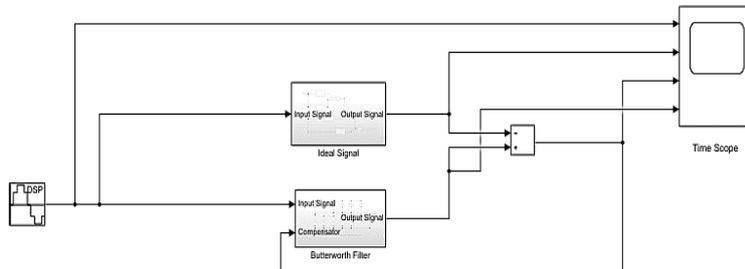


Рис. 9. Процесс компенсации превышения Структура Simulink

Везде, где реальный сигнал и переходный сигнал после осуществления компенсации показаны на рис. 10.

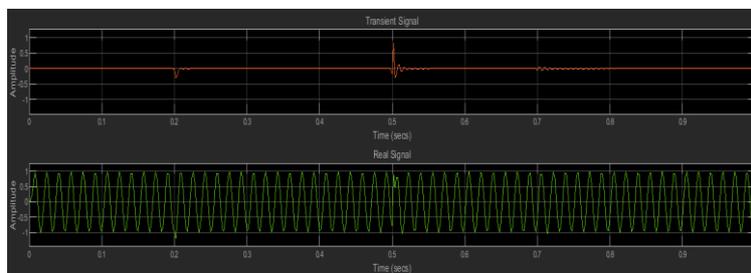


Рис. 10. Реальные и переходные сигналы после процесса компенсации

Заключение. Переходный процесс, возникающий в момент регулировки фильтра (резкое изменение его коэффициентов) на его выходе, является отрицательным фактором. Компенсация может не понадобиться, если частота (коэффициенты фильтра) меняется не резко, а более плавно. Или в несколько шагов. Подтверждение источника и типа сбоя, а также времени, в течение которого оно происходит, поможет компенсировать его. Предложенный метод демонстрирует, что мы можем устранить негативные эффекты процесса перехода, используя несколько процессов фильтрации входных сигналов для получения четкого реального сигнала с минимальными или нулевыми нарушениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mogheer H.S., Ilich T.I.* Analysis of MATLAB System Applicability for Synthesis of Controlled Butterworth Digital Recursive IIR Filters // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №. 3 (220). – С. 72-82.
2. *Piskorowski J., De Anda M.A.G.* A new class of continuous-time delay-compensated parameter-varying low-pass elliptic filters with improved dynamic behavior // I IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2008. – Vol. 56, No. 1. – P. 179-189.
3. *Piskorowski J.* Phase-compensated time-varying Butterworth filters // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2006. – Vol. 47, No. 2. – P. 233-241.
4. *Asker M.A. et al.* Design and Analysis of Robot PID Controller Using Digital Signal Processing Techniques // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, No. 4.37. – P. 103-109.
5. *Wang Y., Ding F., Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing // Digital Signal Processing. – 2018. – Vol. 72. – P. 44-58.
6. *Lutovac M.D., Tošić D.V., Evans B.L.* Filter design for signal processing using MATLAB and Mathematica. – Miroslav Lutovac, 2001.
7. *Lai E.* Practical digital signal processing. – Elsevier, 2003.
8. *Diniz P.S.R., Da Silva E.A.B., Netto S.L.* Digital signal processing: system analysis and design. – Cambridge University Press, 2010.
9. *Oshana R.* DSP for Embedded and Real-time Systems. – Elsevier, 2012.
10. *Wan hammar L., Yu Y.J.* Digital filter structures and their implementation // Academic Press Library in Signal Processing. Т. 1. – Elsevier, 2014. – P. 245-338.
11. *Bansal D.* Real-Time Data Acquisition in Human Physiology: Real-Time Acquisition // Processing, and Interpretation—A MATLAB-Based Approach. Academic Press, 2021.
12. *John Semmlow.* In Signals and Systems for Bioengineers. – Second Ed., 2012.
13. *Wilson P.* Design recipes for FPGAs: using Verilog and VHDL. – Newnes, 2015.
14. *Турulin И. и др.* Управляемые цифровые фильтры. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 306 с.
15. *Mogheer H.S., Turulin I.I.* Reduction of Signal Overshooting Caused by Cutoff Frequency Changing in the Controlled Digital Butterworth Low Pass Filter // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – P. 783-788.
16. *Turulin I.I., Mogheer H.S.* Analysis of Controlled Digital Recursive High-Pass Filters Structures with Infinite Non-Negative Impulse Response // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – P. 755-759.
17. *Wang Y., Ding F. and Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing // Digital Signal Processing. – January 2018. – Vol. 72. – P. 44-58.
18. *Bui N.T., Phan D.T., Nguyen T.P., Hoang G., Choi J., Bui Q. and Oh J.* Real-time filtering and ECG signal processing based on dual-core digital signal controller system // IEEE Sensors Journal, 15 June 2020. – Vol. 20, No. 12. – P. 6492-6503.
19. *Karanov B., Chagnon M., Aref V., Ferreira F., Lavery D., Bayvel P. and Schmalen L.* Experimental investigation of deep learning for digital signal processing in short reach optical fiber communications // 2020 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPs), 23 September 2020. – P. 1- 6.
20. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* FIR filter design using wavelet coefficients // 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), 21 March, 2019. – P. 410-415.

21. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* Frequency sampling method of FIR filter design: a comparative study // 2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT), 2018.
22. *Radha S., Jayashri N., Aysha M. and Kumar C.* High performance hardware design of compressor adder in DA based FIR filters for hearing aids // International Journal of Speech Technology, December 2020. – Vol. 23, No. 4. – P. 807-814.
23. *Ziatdinov S.* Compensation of signal delay in digital smoothing filters // News of higher educational institutions. Instrumentation. – 2012. – Vol. 55, No. 12. – P. 21-25.
24. *Kennedy H.* Recursive digital filters with tunable lag and lead characteristics for proportional-differential control // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2015. – Vol. 23, No. 6. – P. 2369-2374.
25. *Alijan M.* DSP compensation for distortion in RF filters. University of Saskatchewan, Canada, April 2010.
26. *Popov D. and Smolskiy S.* Synthesis and Analysis Non-recursive Rejection Filters in the Transient Mode // Infocommunications Journal. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 28-33.

REFERENCES

1. *Mogheer H.S., Ilich T.I.* Analysis of MATLAB System Applicability for Synthesis of Controlled Butterworth Digital Recursive IIR Filters, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220), pp. 72-82.
2. *Piskorowski J., De Anda M.Á.G.* A new class of continuous-time delay-compensated parameter-varying low-pass elliptic filters with improved dynamic behavior, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, Vol. 56, No. 1, pp. 179-189.
3. *Piskorowski J.* Phase-compensated time-varying Butterworth filters, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2006, Vol. 47, No. 2, pp. 233-241.
4. *Asker M.A. et al.* Design and Analysis of Robot PID Controller Using Digital Signal Processing Techniques, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, No. 4.37, pp. 103-109.
5. *Wang Y., Ding F., Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing, *Digital Signal Processing*, 2018, Vol. 72, pp. 44-58.
6. *Lutovac M.D., Tošić D.V., Evans B.L.* Filter design for signal processing using MATLAB and Mathematica. Miroslav Lutovac, 2001.
7. *Lai E.* Practical digital signal processing. Elsevier, 2003.
8. *Diniz P.S.R., Da Silva E.A.B., Netto S.L.* Digital signal processing: system analysis and design. Cambridge University Press, 2010.
9. *Oshana R.* DSP for Embedded and Real-time Systems. Elsevier, 2012.
10. *Wan hammar L., Yu Y.J.* Digital filter structures and their implementation, *Academic Press Library in Signal Processing*. T. 1. Elsevier, 2014, pp. 245-338.
11. *Bansal D.* Real-Time Data Acquisition in Human Physiology: Real-Time Acquisition, Processing, and Interpretation—A MATLAB-Based Approach. Academic Press, 2021.
12. *John Semmlow.* In Signals and Systems for Bioengineers. Second Ed., 2012.
13. *Wilson P.* Design recipes for FPGAs: using Verilog and VHDL. Newnes, 2015.
14. *Turulin I. i dr.* Upravlyaemye tsifrovye fil'try [Controlled digital filters]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 306 p.
15. *Mogheer H.S., Turulin I.I.* Reduction of Signal Overshooting Caused by Cutoff Frequency Changing in the Controlled Digital Butterworth Low Pass Filter, *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2022, pp. 783-788.
16. *Turulin I.I., Mogheer H.S.* Analysis of Controlled Digital Recursive High-Pass Filters Structures with Infinite Non-Negative Impulse Response, *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2022, pp 755-759.
17. *Wang Y., Ding F. and Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing, *Digital Signal Processing*, January 2018, Vol. 72, pp. 44-58.
18. *Bui N.T., Phan D.T., Nguyen T.P., Hoang G., Choi J., Bui Q. and Oh J.* Real-time filtering and ECG signal processing based on dual-core digital signal controller system, *IEEE Sensors Journal*, 15 June 2020, Vol. 20, No. 12, pp. 6492-6503.

19. *Karanov B., Chagnon M., Aref V., Ferreira F., Lavery D., Bayvel P. and Schmalen L.* Experimental investigation of deep learning for digital signal processing in short reach optical fiber communications, *2020 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPs), 23 September 2020*, pp. 1- 6.
20. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* FIR filter design using wavelet coefficients, *2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), 21 March, 2019*, pp. 410-415.
21. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* Frequency sampling method of FIR filter design: a comparative study, *2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT), 2018*.
22. *Radha S., Jayashri N., Aysha M. and Kumar C.* High performance hardware design of compressor adder in DA based FIR filters for hearing aids, *International Journal of Speech Technology, December 2020*, Vol. 23, No. 4, pp. 807-814.
23. *Ziatdinov S.* Compensation of signal delay in digital smoothing filters, *News of higher educational institutions. Instrumentation*, 2012, Vol. 55, No. 12, pp. 21-25.
24. *Kennedy H.* Recursive digital filters with tunable lag and lead characteristics for proportional-differential control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, Vol. 23, No. 6, pp. 2369-2374.
25. *Alijan M.* DSP compensation for distortion in RF filters. University of Saskatchewan, Canada, April 2010.
26. *Popov D. and Smolskiy S.* Synthesis and Analysis Non-recursive Rejection Filters in the Transient Mode, *Infocommunications Journal*, 2019, Vol. 11, No. 3, pp. 28-33.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.К. Самойлов.

Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер – Южный федеральный университет; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79095343288; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Al-Karawi Hussein Shakor Mogheer – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79095343288; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

Turulin Igor Ilich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-211-222

Р.М. Ауси, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян

МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ

Недавние достижения в технологиях беспроводной связи привели к созданию огромного количества данных, которые передаются повсеместно. Большая часть такой информации является частью обширной и общедоступной сети, которая соединяет различные стационарные и мобильные устройства по всему миру. Возможности электронных устройств также увеличиваются день ото дня, что приводит к большему объему генерации данных и обмена информацией через сети. Аналогичным образом, с ростом разнообразия и сложности структур мобильных сетей увеличилась частота возникновения нарушений безопасности в ней. Это препятствует внедрению интеллектуальных мобильных приложений и услуг, о чем свидетельствует большое разнообразие платформ, которые предоставляют услуги хранения данных, вычислений с данными и приложений конечным пользователям. В таких сценариях становится необходимым защитить данные и проверить их использование в сети и приложениях, а также проверить их некорректное использование с целью защиты частной информации. Согласно данному исследованию, модель безопасности на основе искусственного интеллекта должна обеспечивать конфиденциальность, целостность и надежность системы, ее оборудования и протоколов, управляющих сетью, независимо от ее создания, чтобы управлять такой сложной сетью, как мобильная. Открытые трудности, с которыми все еще сталкиваются мобильные сети, такие как несанкционированное сканирование сети, мошеннические ссылки и т.д., были тщательно изучены в данной статье. Также в данном материале обсуждаются несколько технологий машинного и глубокого обучения, которые можно использовать для создания безопасной среды, а также многие угрозы кибербезопасности. Необходимо обратиться к необходимости разработки новых подходов для обеспечения высокого уровня безопасности электронных данных в мобильных сетях, поскольку возможности повышения безопасности мобильных сетей безграничны.

Сеть; информационная безопасность; компьютерная безопасность; искусственный интеллект; машинное обучение; глубокое обучение; угрозы; кибератаки; уязвимость.

R.M. Ausi, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan

MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING MODELS FOR ELECTRONIC INFORMATION SECURITY IN MOBILE NETWORKS

Recent advances in wireless communication technologies have led to the creation of a huge amount of data that is transmitted everywhere. Most of this information is part of an extensive and publicly accessible network that connects various stationary and mobile devices around the world. The capabilities of electronic devices are also increasing day by day, which leads to more data generation and information exchange through networks. Similarly, with the increasing diversity and complexity of mobile network structures, the frequency of security breaches in it has increased. This hinders the introduction of intelligent mobile applications and services, as evidenced by the wide variety of platforms that provide data storage, data computing and application ser-

vices to end users. In such scenarios, it becomes necessary to protect data and check their use in the network and applications, as well as check their incorrect use in order to protect private information. According to this study, a security model based on artificial intelligence should ensure the confidentiality, integrity and reliability of the system, its equipment and protocols that control the network, regardless of its creation, in order to manage such a complex network as a mobile one. The open difficulties that mobile networks still face, such as unauthorized network scanning, fraudulent links, etc., have been thoroughly studied in this article. This article also discusses several ML and DL technologies that can be used to create a secure environment, as well as many cybersecurity threats. It is necessary to address the need to develop new approaches to ensure a high level of electronic data security in mobile networks, since the possibilities for improving the security of mobile networks are limitless.

Network; information security; cyber security; artificial intelligence; machine learning; deep learning; threats; cyber-attacks; vulnerabilities.

Введение. Электронная информация является важным активом для любой организации, и даже в случае использования ее физическим лицом данные могут иметь для них весьма важное значение, и они не могут позволить себе их потерять. Информационная безопасность стала очень важной в современном компьютерном мире, и она требует потенциальных противодействий постоянно меняющимся угрозам. Следовательно, кибербезопасность и управление рисками жизненно важны для задач, связанных с данными или информацией.

Кибербезопасность – это совокупность процедур, действий людей и технологий, которые помогают защитить электронные информационные ресурсы. Киберзлоумышленников явно больше, чем средств защиты, что вызывает опасения по поводу безопасности конфиденциальных цифровых активов [1–4]. Статистика уязвимостей и несанкционированного доступа показывает, что большинство устройств обмена информацией, особенно мобильные сети, подвержены значительному риску безопасности.

Первым этапом оценки безопасности системы или оценки рисков является идентификация ресурсов. Очень важно определить комплексный подход, соответствующий рискованной ситуации. Это помогает внедрять самые передовые методы прогнозирования и смягчения угроз информационной безопасности. Наиболее подходящая модель также может зависеть от сценариев атаки и цели атаки. Следовательно, для решения проблемы электронной информационной безопасности необходимы надлежащие исследования. По мере увеличения числа кибератак, особенно в мобильных сетях, производительность наших систем для борьбы с ними также увеличивается, как описано в следующих частях данной статьи.

На рис. 1 представлена разработанная общая классификация технологий искусственного интеллекта. Существует широкий горизонт междисциплинарной связи между кибербезопасностью и искусственным интеллектом. Такие технологии, как глубокое обучение, можно использовать для создания сложных моделей обнаружения вторжений, классификации вредоносных программ и определения киберугроз в мобильной сети. Модели ИИ требуют специализированных решений в области кибербезопасности и безопасности, чтобы уменьшить уязвимости и обеспечить лучшую конфиденциальность информации, а также обеспечить безопасную унифицированную среду обучения [5–10].

Мобильные программы-вымогатели, крипто-майнинг, мошеннические приложения и банковские трояны являются одними из наиболее распространенных опасностей для мобильных сетей. Мобильные приложения превзошли настольные программы как самый популярный способ доступа к персонализированным услугам, таким как отправка и получение электронной почты, банковские услуги, онлайн-покупки и автоматизированное управление устройствами. Хакеры пользуются системами исправлений для заражения мобильных приложений, что сделало их

идеальными целями для киберпреступников. Существующие решения в области безопасности кажутся недостаточными для будущих мобильных технологий, которые увеличили скорость передачи данных в сетях. Благодаря усовершенствованию технологии искусственного интеллекта сложные модели делают прорыв в безопасности различных критически важных приложений, многие из которых основаны на мобильных сетях. Однако это не означает, что возможности угроз, использующих нашу систему, уменьшились.



Рис. 1. Общая классификация – методы искусственного интеллекта

Обширные достижения в области мобильных сетей помогают новому поколению сетей работать намного быстрее и безопаснее, чем предыдущие версии. Тем не менее, вызов безопасности от идентифицированных и неидентифицированных рисков указывает на необходимость расширения существующих систем управления рисками. В результате, несмотря на обилие структур для защиты ресурсов организации от киберугроз, вариант для лиц, принимающих решения в области кибербезопасности, остается в основном сложным [3].

Методы машинного обучения. Машинное обучение – это основанный на данных подход к разработке искусственного интеллекта. Это подмножество ИИ, обладающее многими сильными сторонами и использующее статистические методы для целей прогнозирования [5]. Он был разработан в 1940-х годах, но только недавно мы смогли использовать его в повседневной жизни. Алгоритмы машинного обучения обычно используют следующие два типа методов обучения: контролируемое и неконтролируемое обучение. Обучение без учителя не требует обратной связи, тогда как обучение с учителем опирается на обратную связь от человека [11–13]. Машинное обучение имеет много сильных сторон, но наиболее важными из них являются его методология и обучение с подкреплением. Методология машинного обучения включает в себя обучение алгоритма набору данных, чтобы он мог идентифицировать закономерности в новых наборах данных. Обучение с подкреплением – это класс машинного обучения, в котором интеллектуальная система учится методом проб и ошибок, получая вознаграждение или наказание за свои действия. В следующем разделе мы рассмотрим модели машинного обучения для электронной информационной безопасности.

Модели машинного обучения для электронной информационной безопасности. Сетевая безопасность – это постоянно меняющаяся область, в которой каждый день появляются новые угрозы. Модели машинного обучения дают возможность быть в курсе последних технологических разработок в этой области, обеспечивая при этом эффективную защиту от этих новых угроз, а также от старых угроз, которые существовали годами. В этой части статья обсудим некоторые модели машинного обучения, которые также можно использовать в кибербезопасности, такие как обнаружение вторжений и обнаружение аномалий. Обнаружение вторжений – это процесс, в котором вторжение обнаруживается и предотвращается до того, как оно причинит какой-либо вред системе, с другой стороны, обнаружение аномалий фокусируется на выявлении аномалий в системе. Эти методы помогают выявлять вредоносные атаки путем поиска необычных шаблонов или поведения. Биологически вдохновленные методы обычно используются в других алгоритмах машинного обучения, но исследования искусственной системы защиты ограничены.

Еще одним растущим направлением в машинном обучении является полууправляемое обучение, которое определяется как комбинация обучения с учителем и без учителя [14–18]. Модели обучения с подкреплением для сетевой безопасности были разработаны, чтобы помочь в обнаружении и предотвращении кибератак. Эти модели основаны на идее, что система должна иметь возможность учиться на своем прошлом опыте, а затем использовать эти знания для принятия решений в будущем. Его можно обучить обнаруживать определенные шаблоны или поведение, которые являются индикаторами атаки. Затем модель обучения будет отправлять оповещения, когда обнаружит что-то подозрительное, чтобы люди могли при необходимости взять на себя управление и продолжить расследование. На рис. 2 показана разработанная номенклатура современных моделей машинного обучения для электронной информационной безопасности.

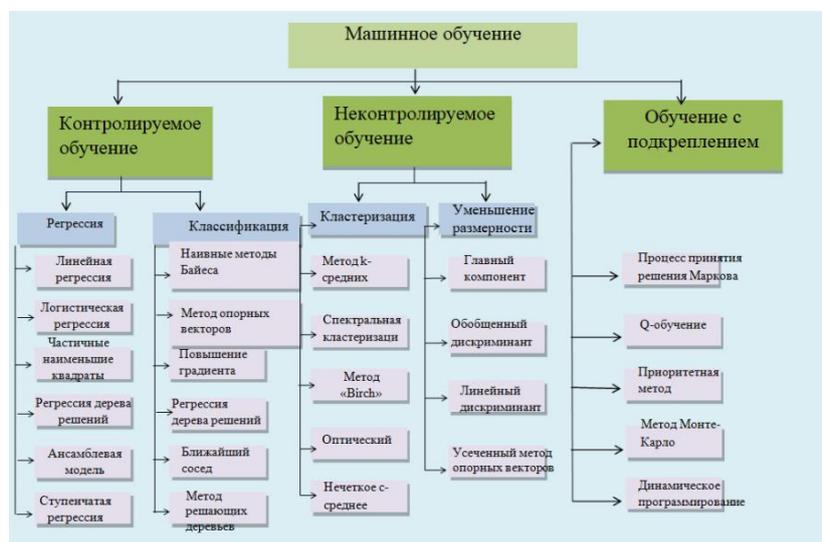


Рис. 2. Разработанная номенклатура современных моделей машинного обучения для электронной информационной безопасности

В табл. 1 представлен разработанный анализ подходов к методам машинного обучения для использования в электронной информационной безопасности в мобильной сети.

Таблица 1

**Анализ подходов к методам машинного обучения для использования
в электронной информационной безопасности**

Категория безопасности	Машинное обучение. Используемые подходы	Ключевой вклад	Ограничения
Схемы сетевых атак	С4.5 Решающее дерево; Байесовская сеть; Наивный байесовский алгоритм	Подход с использованием машинного обучения для определения правил безопасности на контроллере, Влияние незначительных угроз безопасности на безопасность программно-определяемой сети	Подход генерирует переменные результаты для разных наборов данных. Более высокая дисперсия данных приведет к более высоким шансам ложного прогноза
Обнаружение сетевых аномалий	Генетический алгоритм; машины опорных векторов	Выберите более подходящие поля пакета через генетический алгоритм, используя метод выбора основных признаков. Использование усовершенствованного метода машины опорных векторов наряду с возможностью обнаружения новинок машины опорных векторов одного класса обеспечивает высокую производительность машины опорных векторов с мягкой маржой	Для применения структуры в реальной среде трафика TCP/IP потребуются более реалистичный метод профилирования
Классификация трафика	Метод Лапласа машины опорных векторов	Адаптивная классификация потока трафика в режиме реального времени по категории QoS без необходимости точного определения приложения, создающего поток трафика	Маркировка должна выполняться явно для наборов данных в полуконтролируемых алгоритмах, поскольку неконтролируемые алгоритмы на основе машинного обучения не могут быть непосредственно применены в сети
Обнаружение вторжений в реальном времени	Метод роя части; машины опорных векторов	Для построения системы обнаружения вторжений вводится алгоритм, аналогичный подходу выбора на основе метода роя частиц	Требуется улучшение алгоритма выбора признаков по стратегии поиска и критерию оценки
Глушение атак	Искусственные нейронные сети; машины опорных векторов; логистическая регрессия; К-ближайший сосед; древо решений; Наивный байесовский алгоритм	Обнаружение, локализация и предотвращение атак Отключение питания в оптических сетях с использованием различных решений на основе машинного обучения. Снижение вероятности успешного блокирования световых путей с помощью схемы перераспределения ресурсов, использующей статистическую информацию о точности обнаружения атак	Исследуемая локализация ограничена закупоренным каналом

Обнаружение вредоносных программ	Дерево решений; Наивный байесовский алгоритм; обучение с подкрепление	Предоставление централизованного решения для обеспечения безопасности предприятия, которое работает на уровне брандмауэра в сети. Для создания модуля обнаружения вредоносных программ используются современные и усовершенствованные методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных	Предложенное решение непригодно для домашних пользователей, так как для машины общего назначения требуется слишком большой процессор
Сетевые аномалии (DoS Flooding)	AdaboostM1; обучение с подкрепление; Многослойный перцептон	Методы, связанные с машинным обучением, используются для обнаружения и классификации сетевых вторжений с использованием подхода на основе информационной базы управления. Для классификации и обнаружения атак типа «отказ в обслуживании» и «грубой силы» используются различные классификаторы. Использование алгоритмов машинного обучения для данных - очень успешная стратегия для обнаружения DoS-атак и атак методом грубой силы	Ни одному из классификаторов не удалось обнаружить атаку грубой силы в наборе данных TCP. Производительность результатов менее эффективна для классификаторов AdaboostM1 в атаках TCP-SYN и UDP по сравнению с другими атаками
Обнаружение атак интернет-магазинов	Метод k-средних; Многослойный перцептон; Наивный байесовский алгоритм; дерево решений; машины опорных векторов; K-ближайший сосед	Для экспериментов с безопасностью серверов Интернета вещей был составлен новый набор данных, включающий 1551 вредоносный веб-шелл PHP и 2593 обычных скрипта PHP. Для предварительной обработки данных были изучены подходы к извлечению признаков частоты термина, обратной частоте документа, кода операции и комбинированный подход к извлечению признаков кода операции и принципу «частота слова - обратная частота документа». Набор данных анализируется с использованием метода кластеризации признаков, основанного на анализе основных компонентов. Оцениваются функции, важные для обнаружения веб-оболочки	Тесты, проведенные на моделях машинного обучения для обнаружения веб-оболочки только в PHP-скриптах. Для получения более точных результатов требуются серверы IoT с надежной вычислительной мощностью
Помехи на основе атаки типа «Отказ в обслуживании» и «прослушки»	Многослойный перцептон; машины опорных векторов; K-ближайший сосед; дерево решений	Предложение уникального подхода к защите беспроводной связи в беспроводной сети на кристаллах от внешних и внутренних злоумышленников с использованием атак типа «отказ в обслуживании» (DoS)	При наличии внутренней DoS-атаки производительность не столь адекватна и лишь немного лучше, чем у проводной сети на кристалле

		на основе постоянных помех и подслушивания (ED). Защита связи по беспроводным каналам с помощью легкого механизма скремблирования данных с малой задержкой.	
Отравляющие атаки (ненадежные обновления модели)	Стохастический градиентный спуск	Решение проблем ненадежных обновлений модели путем введения репутации в качестве надежной меры для выбора надежных работников для надежного федеративного обучения. Эффективная методика расчета репутации разработана с использованием многовесовой субъективной логической модели.	Каждая обученная локальная рабочая модель должна регулярно отправлять обновления на центральный сервер. Недостаточно надежный метод для мониторинга рабочих показателей.

Изучение и анализ проблем в электронной информационной безопасности в мобильных сетях. В последние годы наблюдается значительный рост сложности и проблем электронного управления данными. Сложность связана с кросс-функциональным характером, который пытается защитить достоверность информации и зависимость для защиты ценных активов организации, улучшая деловое взаимодействие путем создания доверия, деловых союзов и платформ для совместной работы [19–22]. В данной статье определено три следующие проблемы управления, которые необходимо решить, чтобы полностью решить эту проблему: (1) поставить под угрозу безопасность системы путем устранения рисков после создания всей системы; (2) Системы безопасности и информационные системы разрабатываются параллельно; (3) Неадекватное мышление используется для формирования решений [14].

В статье был проведен анализ и составлена схема (рис. 3), иллюстрирующая открытые вопросы, связанные с электронной информационной безопасностью для мобильных сетей.



Рис. 3. Электронная информационная безопасность в мобильных сетях – открытые проблемы

Большинство инцидентов за последние два-три года были связаны с несанкционированным сканированием сети, проверкой, скомпрометированными сервисами, вирусами, вредоносным кодом и аномалиями веб-сайтов. С каждым годом количество аварий увеличивается, как и количество новых уязвимостей. Тем не менее, они определенно разделяют определенный шаблон, с помощью которого они изошренно атакуют систему, оставляя пользователя в неведении. Многие из этих атак даже не требуют создания новой технологии для борьбы с ними. Кроме того, в этой ситуации могут помочь изменения в существующих технологиях. Однако время на борьбу с угрозой настолько ограничено, что иногда мы не можем вмешаться.

Одной из самых известных и сложных проблем с моделями машинного обучения является их уязвимость для атак противника. Эти атаки предназначены для того, чтобы обманом путем классификаторы ошибочно классифицировали входную выборку как принадлежащую одному классу, хотя на самом деле она принадлежит другому. Текущие исследования состязательного ИИ сосредоточены на методах, при которых небольшие модификации входных данных машинного обучения могут обмануть классификатор машинного обучения, заставив его реагировать неправильно.

На рис. 4 показана разработанная схема будущих направлений исследований, связанных с электронной информационной безопасностью для мобильных сетей.



Рис. 4. Будущие направления исследований – электронная информационная безопасность в мобильных сетях

Вывод. Раннее обнаружение и устранение киберугроз приобрели первостепенное значение в современном мире, будь то отдельные лица или мегаорганизации, имеющие дело с электронной информацией и данными. Противники больше не полагаются только на обычные стратегии нападения и со временем развиваются, что вызывает необходимость в разработке и развитии ранее существовавших планов защитных действий [11]. В этой статье мы стремимся объединить различные подходы, предложенные в недавних исследованиях, с помощью методов с поддержкой ИИ, таких как машинное и глубокое обучение, для повышения чувства безопасности

в мобильных сетях [12–15]. На основе рассмотренных статей представлен краткий обзор популярных алгоритмов машинного обучения, за которым следует обзор предложений, направленных на борьбу с многочисленными категориями угроз безопасности. соответствующие статьи были оценены, чтобы определить влияние различных поворотов, внесенных в общие алгоритмы машинного и глубокого обучения, на уязвимости, с которыми сталкиваются электронные информационные системы и мобильные сети. Предоставляя краткий обзор наиболее известных наборов данных, которые используются для обучения и тестирования моделей, была проведена качественная разбивка наборов данных о кибератаках. Наконец, чтобы поощрить будущих исследователей и энтузиастов, были изложены краткие обзоры текущих открытых проблем и потенциальных областей исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кейт А. Смит, Джатиндер Н.Д. Гунта. Нейронные сети в бизнесе: методы и приложения для исследователя операций // *Computers & Operations Research*. – 2000. – Т. 27. – С. 1023-1044.
2. Заргарян Е.В., Акподжаниян Ж.Ж. Исследование автоматизации коллаборативных роботов и способы их применения // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. "Технологии разработки информационных систем". – 2020. – С. 218-223.
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. Джордж Боджадиев, Мария Боджадиев. Нечеткая логика для бизнеса, финансов и управления. – 2-е изд. Достижения в области нечетких систем - Приложения и теория. – Т. 23.
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. 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.
8. Soomro Z.A., Shah M.H., & Ahmed J. Information security management needs more holistic approach: A literature review // *International Journal of Information Management*. – 2016. – Vol. 36 (2). – P. 215-225]
9. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Т. 12, No. 23. – P. 6762-6772.
10. 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.
11. Лантнев А.С., Шестова Е.А. Недостатки нейро-экспертных систем управления и способы их решения // *Наука и современность: Матер. Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. – Таганрог, 2021. – С. 104-106.
12. Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьев В.В. Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // *Информатизация и связь*. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
13. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data. – 2015.

14. Singh A.N., Gupta M.P., & Ojha A. Identifying factors of "organizational information security management" // *Journal of Enterprise Information Management*] – 2014.
15. Пушнина И.В. Система управления подвижным объектом в условиях неопределенности // Наука и образование на рубеже тысячелетий. сборник научно-исследовательских работ. – Кисловодск: Кисловодский гуманитарно-технический институт, ЮФУ, 2018. – С. 65-74.
16. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 1866-1881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
17. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security. – 2018. – URL: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security/>.
18. Kim J., Tae D., Seok J. A survey of missing data imputation using generative adversarial networks // *Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020*. – P. 454-456. – DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.
19. Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of the General Theory of Environmental Safety Ensuring // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference*. – Krasnoyarsk, 2021. – P. 12072.
20. Ma Q., Johnston A.C., & Pearson J.M. Information security management objectives and practices: a parsimonious framework // *Information Management & Computer Security*] – 2008.
21. Шестова Е.А., Шадрин В.В. Исследование построения видов операций над нечеткими множествами и нечеткой аппроксимирующей системы в среде MATLAB: учеб. пособие. – Таганрог, 2019.
22. 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. Keyt A. Smit, Dzhatinder N.D. Gupta. Neyronnye seti v biznese: metody i prilozheniya dlya issledovatelya operatsiy [Neural Networks in Business: Methods and Applications for the Operations Researcher], *Computers & Operations Research*, 2000, 27, pp. 1023-1044.
2. Zargaryan E.V., Akopdzhanyan Zh.Zh. Issledovanie avtomatizatsii kollaborativnykh robotov i sposoby ikh primeneniya [Research of automation of collaborative robots and methods of their application], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem"* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference "Technologies for the Development of Information Systems"], 2020, pp. 218-223.
3. Zargaryan Yu.A. Zadacha upravlyaemosti v adaptivnoy avtomatnoy obuchaemoy sisteme upravleniya [The problem of controllability in an adaptive automaton learning control system], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem"* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference. "Technologies for the Development of Information Systems"], 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. Dzhordzh Bodzhadziev, Mariya Bodzhadziev. Nechetkaya logika dlya biznesa, finansov i upravleniya [Fuzzy Logic for Business, Finance and Management]. 2nd ed, *Dostizheniya v oblasti nechetkikh sistem - Prilozheniya i teoriya* [Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory], Vol. 23.
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. 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.
8. Soomro Z.A., Shah M.H., & Ahmed J. Information security management needs more holistic approach: A literature review, *International Journal of Information Management*, 2016, Vol. 36 (2), pp. 215-225
9. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, Vol. 12, No. 23, pp. 6762-6772.
10. 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.
11. Laptsev A.S., Shestova E.A. Nedostatki neuro-ekspertnykh sistem upravleniya i sposoby ikh resheniya [Disadvantages of neuroexpert control systems and ways to solve them], *Nauka i sovremennost': Mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh* [Science and Modernity. Materials of the All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists]. Taganrog, 2021, pp. 104-106.
12. 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 mobile objects in conditions of uncertainty for the choice of control solutions], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2016, No. 3, pp. 56-62.
13. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data, 2015.
14. Singh A.N., Gupta M.P., & Ojha A. Identifying factors of "organizational information security management", *Journal of Enterprise Information Management*, 2014.
15. Pushnina I.V. Sistema upravleniya podvizhnym ob"ektom v usloviyakh neopredelennosti [Control system of a moving object under conditions of uncertainty. In the collection], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy. sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education at the turn of the millennium. collection of research papers]. Kislovodsk: Kislovodskiy gumanitarno-tehnicheskiiy institut, YuFU, 2018, pp. 65-74.
16. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 1866-1881. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
17. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security, 2018. Available at: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security/>.
18. Kim J., Tae D., Seok J. A survey of missing data imputation using generative adversarial networks, *Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020*, pp. 454-456. DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.
19. Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of the General Theory of Environmental Safety Ensuring, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 12072.
20. Ma Q., Johnston A.C., & Pearson J.M. Information security management objectives and practices: a parsimonious framework, *Information Management & Computer Security*, 2008.
21. Shestova E.A., SHadrina V.V. Issledovanie postroeniya vidov operatsiy nad nechetkimi mnozhestvami i nechetkoy approksimiruyushchey sistemy v srede MATLAB: ucheb. posobie [Investigation of the construction of types of operations on fuzzy sets and a fuzzy approximating system in MATLAB: textbook]. Taganrog, 2019.
22. 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.

Ауси Рим Мохаммед Худхейр – Южный федеральный университет; e-mail: ausi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Заргарян Елена Валерьевна – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Заргарян Юрий Артурович – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Aussi Rim Mohammed Hedhair – Southern Federal University; e-mail: ausi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

Zargaryan Elena Valerevna – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zargaryan Yuri Arturovich – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-222-234

С.И. Клевцов

ВЫБОР МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЬЮ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

На примере датчика давления рассматривается проблема подбора модели и параметров функции преобразования микропроцессорного датчика. Функция преобразования базируется на математической модели, которая ставит в соответствие электрическому сигналу, поступающему с измерительного преобразователя датчика, значение физической величины. Модель функции преобразования микропроцессорного датчика должна повторять реальную пространственную зависимость электрического сигнала от измеряемой величины и учитывать влияние дестабилизирующих факторов, таких как температура. Микропроцессорные датчики используют для измерения параметров объекта с заданной точностью. Основной вклад в погрешность измерений вносит неточность аппроксимации реальной функции преобразования ее моделью. Необходимость достижения оптимального уровня погрешности измерения параметра в системе с учетом сложности и стоимости измерений требует управления погрешностью датчика. С этой целью представлены различные модели и методы аппроксимации. Для эффективного управления погрешностью предлагается метод мультисегментной пространственной аппроксимации, в основе которого лежат модели линейных или нелинейных пространственных элементов. Сформулирована процедура управления погрешностью. Порядок использования модели мультисегментной пространственной аппроксимации характеристики преобразования для вычислений давления с учетом влияния температуры основан на комбинированном применении линейных и нелинейных пространственных элементов в рамках одной модели. Процедура подбора типа сегмента должна начинаться с оценки возможности использования сначала линейного пространственного элемента, а в случае невозможности выполнения требований по точности, анализа использования нелинейного элемента. Метод позволяет изменять типы и конфигурацию пространственных элементов и таким способом влиять на погрешность измерений. Преимущества данного подхода подтверждаются результатами моделирования.

Модель; микропроцессорный датчик; характеристика преобразования; погрешность; аппроксимация.

S.I. Klevtsov

SELECTION OF THE SENSOR CONVERSION CHARACTERISTIC MODEL FOR CONTROLLING THE ERROR IN THE MEASUREMENT OF PHYSICAL QUANTITIES

On the example of a pressure sensor, the problem of selecting a model and parameters of the conversion function of a microprocessor sensor is considered. The conversion function is based on a mathematical model that associates the electrical signal coming from the sensor's measuring transducer with the value of a physical quantity. The model of the conversion function of a microprocessor sensor must repeat the real spatial dependence of the electrical signal on the measured value and take into account the influence of external factors, such as temperature. Microprocessor sensors are used to measure the parameters of an object with a given accuracy. The main contribution to the measurement error is made by the inaccuracy of the approximation of the real transformation function by its model. The need to achieve the optimal level of parameter measurement error in the system, taking into account the complexity and cost of measurements, requires the control of the sensor error. For this purpose, various models and methods of approximation are presented. For efficient error control, a method of multi-segment spatial approximation based on models of linear or non-linear spatial elements is proposed. The error control procedure is formulated. The procedure for using the model of multi-segment spatial approximation of the transformation characteristic for pressure calculations taking into account the influence of temperature is based on the combined use of linear and non-linear spatial elements within the same model. The segment type selection procedure should begin with an assessment of the possibility of using a linear spatial element first, and if it is impossible to meet the accuracy requirements, an analysis of the use of a non-linear element. The method allows you to change the types and configuration of spatial elements and in this way influence the measurement error. The advantages of this approach are confirmed by the simulation results.

Model; microprocessor sensor; conversion function; error; approximation.

Введение. Увеличение точности и достоверности вычисления измеряемых значений является одной из важных задач разработки методов обработки результатов измерений в микропроцессорных датчиках физических величин. От точности измерений зависит возможность обеспечения эффективного мониторинга работы различных технических объектов, их надежность и безопасность. В микропроцессорном датчике реализуется такой вид характеристики преобразования, которая в максимальной степени повторяет форму функции преобразования сенсора или первичного преобразователя датчика [1, 2]. Важно также, чтобы характеристика преобразования учитывала поведение функции преобразования датчика в случае влияния внешних факторов [1].

Обычно для аналогового датчика формируют характеристику преобразования в виде линейной функции. Реализуется это с помощью конструкционных и схемотехнических методов [1, 2]. Микропроцессорный датчик использует для определения характеристику преобразования, представленную в виде математических выражений и алгоритмов их реализации. Модель характеристики преобразования должна повторять форму реальной характеристики [3, 4]. Точность аппроксимации определяется требованиями задач, решаемых датчиком.

При построении модели характеристики преобразования микропроцессорного датчика медленно меняющихся физических величин, например, давления, учитываются различные технические требования. Одними из основных требований являются требования к точности аппроксимации модели. Помимо этого, необходимо обеспечить заданную погрешность в рамках всего диапазона изменения физического сигнала и действующих факторов, реализовать вычисления с низким уровнем сложности, чтобы можно было выполнять вычисления в контроллере в «фоновом режиме» [3, 4].

Точность измерений, выполняемых микропроцессорным датчиком, в значительной степени определяется выбором модели характеристики преобразования и, соответственно, погрешностью аппроксимации этой характеристики [5, 6]. Требования к точности измерений, в свою очередь, формируются исходя из анализа задач, которые решаются с использованием измеренных значений. Достижение высокой точности вычислений часто связано со сложными и ресурсоемкими моделями и алгоритмами и во многих случаях не нужно для решения поставленной задачи. Поэтому, при выборе модели характеристики преобразования датчика следует исходить из соображений достижения уровня достаточной точности вычислений значений физической величины.

Анализ моделей характеристики преобразования датчика. Измерение физических величин, таких как давление осуществляется в микропроцессорных датчиках с использованием различных моделей характеристик преобразования. Как правило, в основу этих моделей положено пространственное представление о функции преобразования сенсора. Характеристика преобразования связывает измеряемую физическую величину, электрический сигнал с канала измерения физической величины и электрический сигнал с канала измерения внешнего фактора. Также постулируется, что модель не меняет свое представление во всей области определения, то есть области определения измеряемого сигнала и воздействующего фактора [1–10].

Наиболее простой моделью характеристики преобразования является кусочно-линейная аппроксимация [1, 2, 6, 8]. Она используется в тех случаях, когда реальная функция преобразования сенсора характеризуется незначительной нелинейностью, а требования к точности измерений невысокие.

Для построения модели требуется формирование массива идентификационных точек, которые используются для аппроксимации. Их количество определяется заданной точностью аппроксимации. В работе [2], чтобы получить приведенную относительную погрешность 0,5%, сформировали массив идентификационных точек из 51 значения. Массив охватывает всю область определения характеристики преобразования. По оси давления было выбрано 17 точек для каждого значения температуры, как воздействующего фактора. Область изменения температуры разделена на три зоны, для каждой из которых определена идентификационная точка. Для ускорения работы алгоритма аппроксимации ордината калибровочной точки определяется кодом 12-разрядного АЦП.

Нелинейность функции преобразования в результате использования модели снизилась с 5% до 0,05%. Погрешность, связанная с влиянием температуры, на каждые 10^0C уменьшилась с 2,5% до 0,1% [2].

Датчик давления калибровался при температуре $T_{\text{ср}}=20^0\text{C}$. Тогда только составляющая погрешности, связанная с влиянием температуры, на границах диапазона изменения температур от -40^0C до $+80^0\text{C}$ составит величину порядка 0,6%, что не позволяет использовать датчик для высокоточных измерений [2]. Но если к датчику не предъявляются высокие требования к точности, использование данной модели оправдано [7].

В работе [9] модель характеристики преобразования представляет собой набор плоскостей, построенных на основе пересекающихся в пространстве $P \times U_P \times U_T$ прямых.

Пусть функция $P=P(U_P, U_T)$ имеет область определения $D(U_P, U_T)$: $U_P \in [U_{P1}, U_{P2}]$, $U_T \in [U_{T1}, U_{T2}]$. Разобьем область определения по оси $0U_P$ на k равных частей и по оси $0U_T$ на l равных частей. Получим $k \times l$ прямоугольных участков.

Будем приближать поверхность модели характеристики преобразования плоскостями на каждом участке $D_{n,m}$. Зафиксируем на участке $D_{n,m}$ средние значения переменных $U_{Pcp,n}$ и $U_{Tcp,m}$

$$U_{Pcp,n} = U_{P1,n} + (U_{P2,n} - U_{P1,n})/2,$$

$$U_{Tcp,m} = U_{T1,m} + (U_{T2,m} - U_{T1,m})/2,$$

где $U_{P1,n}, U_{P2,n}, U_{T1,m}, U_{T2,m}$ – границы участка $D_{n,m}$.

Выражения $P_{1,n,m} = P_{1,n,m}(U_{Pcp,n}, U_T)$ и $P_{2,n,m} = P_{2,n,m}(U_P, U_{Tcp,m})$ определяют взаимно перпендикулярные плоскости в пространстве $P \times U_P \times U_T$, каждая из которых также перпендикулярна плоскости $P=0$.

Используя экспериментальные данные, определяющие зависимость $P=P(U_P, U_T)$, где значения $U_P, U_T \in D_{n,m}$, методом наименьших квадратов получим уравнения двух прямых $P'_{1,n,m}(U_T) \in P_{1,n,m}$ и $P'_{2,n,m}(U_P) \in P_{2,n,m}$.

Эти прямые принадлежат перпендикулярным плоскостям и являются скрещивающимися. Плоскости $P_{1,n,m}$ и $P_{2,n,m}$ пересекаются по прямой, перпендикулярной плоскости $P=0$, а сама прямая пересекает эту плоскость в точке с координатами $(U_{Pcp,n}, U_{Tcp,m})$.

Для построения пересекающихся прямых $P''_{1,n,m}(U_T)$ и $P''_{2,n,m}(U_P)$ необходимо скрещивающиеся прямые сблизить на расстояние $\delta P = |P'_{1,n,m}(U_{Tcp,m}) - P'_{2,n,m}(U_{Pcp,m})|$, как показано на рис. 1.

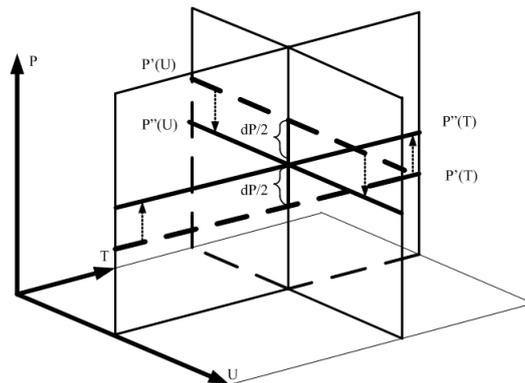


Рис. 1. Схема формирования пересекающихся прямых

Построение плоскости по двум пересекающимся прямым $P''_{1,n,m}(U_T)$ и $P''_{2,n,m}(U_P)$ осуществляется методами линейной алгебры. В результате получаем характеристику преобразования, представляющую совокупность плоскостей, аппроксимирующих реальную функцию преобразования датчика. Следует отметить, что на границах построенных плоскостей есть зоны, где не определена характеристика преобразования датчика. Это требует дополнительных вычислений, что приводит к увеличению погрешности аппроксимации.

Модифицированный алгоритм линеаризации характеристики преобразования и температурной компенсации при вычислении давления предложен в работе [8].

В основе алгоритма лежит определение зависимости кода выходного параметра $P_{код}$, характеризующего сигнал давления, от кода температуры $T_{код}$ на прямоугольной сетке с равноотстоящими узлами ко каждой координате, причем для удобства вычислений в контроллере число интервалов разбиения области параметров, то есть давления и температуры, должно быть равно целой степени двух.

На этой основе формируется двумерная таблица значений кодов, которая используется для вычисления давления с учетом влияния температуры. Вычисление давления при промежуточных значениях кодов давления и температуры, не указанных в таблице, осуществляется с помощью аппроксимации по имеющимся точкам в таблице.

Результаты испытаний датчика с использованием микроконтроллера MSP430 с аппаратным умножителем показали, что алгоритм способен обеспечить погрешность не более ± 1 значащего разряда при 12- разрядном АЦП. Также отмечается высокая скорость реализации алгоритма [8].

В настоящее время в случае, если требуются более точные измерения давления, для реализации модели характеристики преобразования часто применяются полиномиальные функции.

Электрический сигнал, который снимается с измерительного канала давления, представляется в виде полинома первой или второй степени. В матричном виде соотношения, определяющие модель, выглядят следующим образом [10, 11, 12, 13]:

$$P = [1 \quad U \quad U^2] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{20} & \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix},$$

$$P = [1 \quad U] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix}.$$

Для реализации модели характеристики преобразования необходимо определение коэффициентов γ_{ij} . Модель позволяет вычислять значения давления P для любых значений пары электрических сигналов с канала температуры и канала давления. Таким образом, формируется единая модель характеристики преобразования для всего диапазона изменения сигнала с канала давления и канала температуры [10].

В работе [10] была рассмотрена модель характеристики преобразования как аппроксимации обратной функции преобразования пьезорезисторного кремнивого сенсора датчика давления. Использовалась аппроксимация в виде полиномиальной функции второго порядка относительно давления и температуры. Модель обеспечила снижение предельной погрешности измерений до $\pm 0,2\%$ за счет учета нелинейности реальной функции преобразования. В диапазоне температур от 0 до 70°C температурная погрешность снизилась до $\pm 0,1\%$. Но для достижения этих результатов пришлось сформировать массив исходных данных не менее 10000 точек. Однако, при серийном производстве датчиков такой объем градуировочных испытаний практически невозможно реализовать.

Управление погрешностью аппроксимации при выборе конфигурации пространственной модели характеристики преобразования датчика. Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования датчика можно воспользоваться методом мультисегментной пространственной аппроксимации (МСПА ХП).

В качестве отдельных элементов аппроксимирующей поверхности, моделирующей характеристику преобразования датчика, в методе применяются линейные и нелинейные пространственные элементы [13–20]. Таким образом, реальная характеристика преобразования сенсора заменяется системой локальных поверхностей [11]. Форма реальной характеристики преобразования в этом случае имитируется локальными пространственными элементами. Выбирая для определенного участка области определения характеристики преобразования вид сегмента, его конфигурацию и параметры, можно управлять погрешностью аппроксимации характеристики.

Метод базируется на нескольких основных положениях [13, 19, 20].

Модель пространственной характеристики преобразования должна повторять конфигурацию функции преобразования сенсора датчика с учетом влияния внешних и внутренних факторов, таких как температура, нелинейность, дрейф нуля [19].

Должна быть обеспечена заданная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика, соответствующая требованиям решаемой задачи измерения физической величины во всем диапазоне ее изменения и изменения внешнего влияющего фактора. При этом учитывается сложность вычислений.

Модель характеристики преобразования базируется на пространственной аппроксимации характеристики преобразования, которая представляет собой систему локальных линейных или нелинейных пространственных элементов (сегментов). Также возможно применение нелинейных и линейных элементов одновременно в одной модели характеристики преобразования исходя из особенностей реальной функции преобразования сенсора датчика.

Пространственные элементы модели характеристики преобразования датчика на границе раздела их областей определения могут не сшиваться. Более того, они могут перекрываться (рис. 2). Таким образом достигается большая свобода в выборе элементов для аппроксимации без снижения точности. Необходимо лишь обеспечить заданную погрешность аппроксимации характеристики преобразования на границе раздела областей определения сегментов. Причем достаточно, чтобы точность измерений была обеспечена использованием только одного из пространственных элементов.

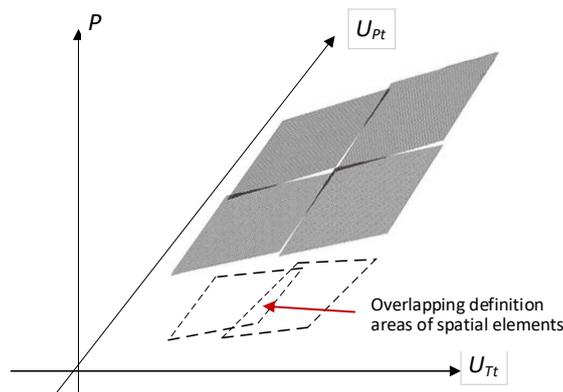


Рис. 2. Схема перекрытия пространственных элементов, аппроксимирующих характеристику преобразования

Наиболее опасным внешним воздействующим фактором, существенно влияющим на погрешность измерения медленно меняющейся физической величины, например, давления, является температура окружающей среды. Тогда в общем виде пространственная модель характеристики преобразования датчика давления с учетом влияния температуры представляется выражением:

$$P_t = P(U_{Pt}, U_{Tt}, \bar{\gamma}_{\alpha\beta}, \Omega_{\alpha\beta}, F_{\alpha\beta}, \varepsilon_P),$$

где P_t – значение давления в момент времени t ; U_{Pt} – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части микропроцессорного датчика (далее, канал давления датчика) в момент времени t ; U_{Tt} – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала температуры аналоговой части микропроцессорного датчика (далее, сигнал канала

температуры) в момент времени t ; $\Omega_{\alpha\beta} = \bar{U}_{P\alpha} \cup \bar{U}_{T\beta}$ – область определения $\alpha\beta$ -го сегмента характеристики, α – номер интервала разбиения зоны изменения сигнала канала давления, $\alpha = 1, \dots, L_P$; β – номер интервала разбиения зоны изменения сигнала канала температуры, $\beta = 1, \dots, L_T$; L_{PT} – общее количество сегментов; $\bar{U}_{P\alpha} = \{U_P \in [U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}]\}$ – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу давления для области определения $\alpha\beta$ -го сегмента; $U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}$ – нижняя и верхняя границы диапазона $\bar{U}_{P\alpha}$; $\bar{U}_{T\beta} = \{U_T \in [U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}]\}$ – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу температуры для области определения $\alpha\beta$ -го сегмента; $U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}$ – нижняя и верхняя границы диапазона $\bar{U}_{T\beta}$; $\bar{Y}_{\alpha\beta}$ – массив значений коэффициентов аппроксимации $\alpha\beta$ -го сегмента характеристики; $F_{\alpha\beta}$ – функция, аппроксимирующая $\alpha\beta$ -й сегмент характеристики датчика; ε_P – максимальная погрешность аппроксимации характеристики преобразования.

Для построения МСПА ХП датчика используются данные, которые формируются на основе градуировочных испытаний [19]. При фиксированной температуре на датчик подается давление с заданным шагом с изменением от наименьшей границы диапазона к наибольшей и обратно. Проводится несколько циклов испытаний. Затем меняется температура среды и процесс повторяется. В результате после предварительной обработки имеется массив значений сигналов с каналов давления и температуры, который характеризует поведение датчика при воздействии измеряемой величины с учетом влияния внешнего фактора.

Можно использовать различные функциональные зависимости для построения сегментов МСПА ХП датчика в виде локального линейного элемента (плоскости) или локального нелинейного элемента (поверхности).

Использование линейных пространственных элементов (ЛПЭ) в качестве сегментов целесообразно, если требуется получить приемлемую точность аппроксимации характеристики преобразования при низкой сложности вычислений в микроконтроллере [13, 16, 19, 20].

Для достижения высокой точности вычислений физической величины в качестве элементов модели характеристики преобразования целесообразно использовать нелинейные пространственные элементы (НПЭ) [13, 19, 20].

Возможна комбинация ЛПЭ и НПЭ при построении МСПА ХП, когда в области определения характеристики преобразования можно выделить подобласти, которые обладают более низкой нелинейностью по сравнению с другими.

Наиболее приемлемыми моделями сегментов являются полиномы первой, второй и третьей степени [13, 16, 18, 19, 20].

Модель аппроксимирующей плоскости в виде полинома первой степени:

$$P = A_{\alpha\beta} + B_{1\alpha\beta} \cdot U_{Pt} + B_{2\alpha\beta} \cdot U_{Tt}, \quad (1)$$

где $A_{\alpha\beta}, B_{1\alpha\beta}, B_{2\alpha\beta}$ – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ в его области определения $\Omega_{\alpha\beta}$ в виде линейного пространственного элемента.

Модель аппроксимирующей поверхности в виде полинома второй или третьей степени:

$$P = \sum_{i=0}^I \alpha_i^{\alpha\beta} \cdot U_{Pt}^i, I = 2, 3 \quad (2)$$

$$\alpha_i^{\alpha\beta} = \sum_{l=0}^L \gamma_{il}^{\alpha\beta} \cdot U_{Tt}^l, L = 2, 3, \quad (3)$$

где $\alpha_i^{\alpha\beta}$ и $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$ – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ в его области определения $\Omega_{\alpha\beta}$ в виде нелинейного пространственного элемента; U_{Pt} и U_{Tt} – значения электрических сигналов канала давления и канала температуры датчика в момент времени t .

Очевидно, что коэффициенты $a_i^{\alpha\beta}$ зависят только от температуры. Коэффициенты $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$ являются постоянными величинами для каждого сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ и не зависят от температуры.

Выражение (2) учитывает нелинейность характеристики при фиксированной температуре, а выражение (3) описывает нелинейность характеристики при изменении температуры.

Для определения коэффициентов в выражениях (1), (2) и (3) используется метод наименьших квадратов. Для каждого сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ определяется свой набор коэффициентов.

Схема использования МСПА ХП датчика для измерения физической величины (давления) с учетом воздействия внешнего фактора (температуры):

В процессе измерения на выходе канала давления и канала температуры датчика зафиксированы электрические сигналы U_{P_k} и U_{T_k} , полученные при воздействии текущих значений давления P_k и температуры окружающей среды T_k .

По известным значениям электрических сигналов U_{P_k} и U_{T_k} находится область определения сегмента пространственной характеристики преобразования. Сначала вычисляется номер интервала разбиения по температуре β . Используется текущее значение электрического сигнала канала температуры ($U_{T_k} \in \Omega_{\alpha\beta}$). Затем вычисляется номер интервала разбиения α , которому принадлежит текущее значение сигнала канала давления ($U_{P_k} \in \Omega_{\alpha\beta}$). Номер интервала разбиения по температуре β в данном случае играет роль ограничивающего фактора.

Выбирается сегмент модели, соответствующий области определения $\Omega_{\alpha\beta}$, полученной на предыдущем этапе обработки. Фактически определяются значения коэффициентов в выражениях (1) или (2).

Согласно выражениям (1) или (2) вычисляется давление. Для этого используются определенные коэффициенты аппроксимации и текущие значения электрических сигналов каналов давления и температуры.

Результаты моделирования характеристики преобразования. Исходные данные для моделирования были получены при проведении градуировочных испытаний двух первичных измерительных преобразователей (сенсоров) датчиков давления, сенсор №1 и сенсор №2. Сенсоры предназначены для измерения давления до 60 кгс/см² и 10 кгс/см² соответственно в диапазоне температур от -40⁰С до +80⁰С.

Анализ данных испытаний показал, что имеется небольшая нелинейность реальной функции преобразования сенсоров при фиксированной температуре. Нелинейность возрастает на начальном и конечном участках диапазона изменения давления по оси давлений. Выходной сигнал с канала температуры имеет ярко выраженный нелинейный характер. Для фиксированного давления наблюдается нелинейный рост сигнала при низких температурах и снижение при высоких температурах. Реальная функция преобразования сенсоров представляет собой поверхность в системе параметров $P \times U_P \times U_T$. Если ориентироваться по оси давления, то нижняя и верхняя части поверхности повернуты друг относительно друга относительно условной линии раздела. Для сенсора № 2 эта линия раздела наблюдается при $P \sim 360-380$ КПа.

В целом график в системе параметров $P \times U_P \times U_T$ носит нелинейный характер и требует построения характеристики преобразования, учитывающей эти особенности.

Для оценки возможности управления погрешностью при использовании МСПА ХП для сенсоров №1 и №2 были выбраны конфигурации линейных и нелинейных пространственных элементов с учетом особенностей координатной сетки испытаний в области изменения факторов $P \times T$.

Для сенсора №1 пространственная характеристика преобразования формировалась на основе ЛПЭ размерами $6 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$, НПЭ – $12 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$. Для сенсора №2 размеры ЛПЭ были выбраны $1 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$, а НПЭ – $2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$.

Для моделирования, с учетом ограничений, связанных с объемом испытаний, были выбраны минимальные из допустимых размеры пространственных элементов.

Результаты моделирования для сенсора №1 при температурах $T = -40^\circ\text{C}$ и $T = 80^\circ\text{C}$ представлены на рис. 3, 4.

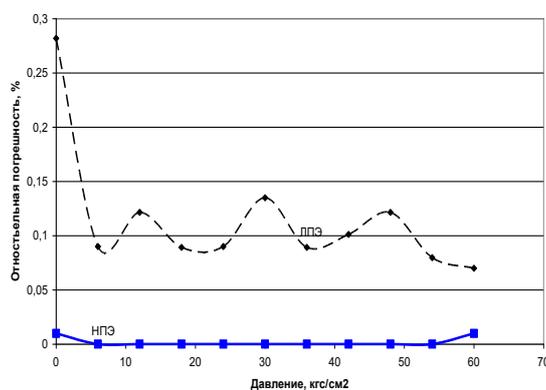


Рис. 3. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №1 при $T = -40^\circ\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

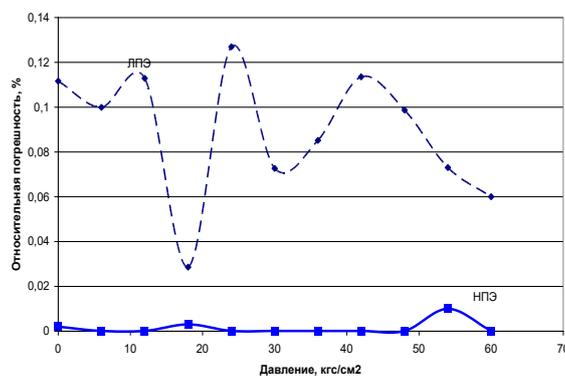


Рис. 4. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №1 при $T = 80^\circ\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

На рис. 5 и 6 представлены аналогичные графики относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования для сенсора №2.

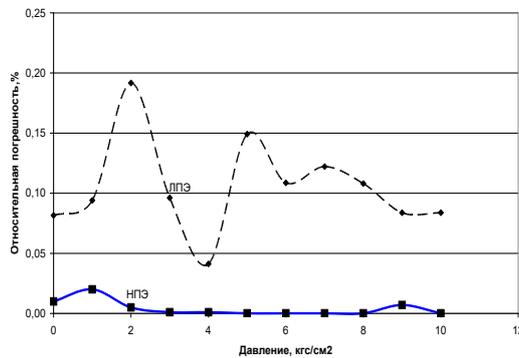


Рис. 5. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №2 при $T = -40^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

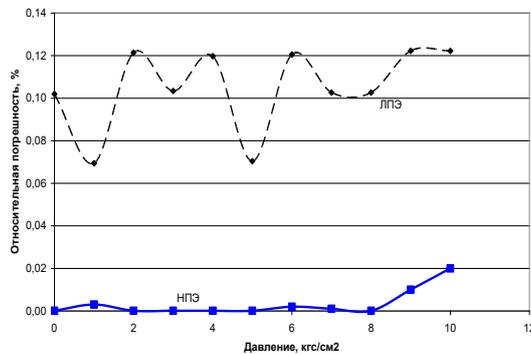


Рис. 6. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №2 при $T = 80^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

Закключение. Анализ результатов моделирования показывает, что наименьшая погрешность аппроксимации характерна для случая использования нелинейных пространственных элементов. Например, относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования с использованием НПЭ на подобласти размером $2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^{\circ}\text{C}$ для ЧЭ № 2 не выше $0,03\%$ в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 10 кгс/см^2 и температур от -40°C до 80°C .

В случае использования линейных пространственных элементов погрешность аппроксимации выше. Для ЧЭ №1 и №2 погрешность аппроксимации заключена в среднем в диапазоне $0,1\% \pm 0,05\%$, что значительно выше по сравнению с погрешностью при применении НПЭ. Плоскостная модель сегмента МСПА ХП, естественно, менее чувствительна к нелинейностям исходной функции преобразования ЧЭ, ее адаптационные способности ниже относительно нелинейно модели.

Однако, если задача, поставленная перед датчиком, не требует очень высокой точности измерений, то целесообразно использовать линейные модели сегментов, поскольку они характеризуются низкой сложностью и, соответственно, простотой вычислений давления. Это влияет на выбор контроллера датчика, его стоимость и стоимость измерений.

Порядок использования МСПА ХП для вычислений давления с учетом влияния температуры основан на комбинированном применении линейных и нелинейных пространственных элементов в рамках одной модели МСПА ХП. Но процедура подбора типа сегмента должна начинаться с оценки возможности использования сначала линейного пространственного элемента, а в случае невозможности выполнения требований по точности, анализа использования нелинейного элемента.

Кроме того, метод построения МСПА ХП позволяет модифицировать текущую модель пространственной аппроксимации, изменяя типы локальных пространственных элементов и таким образом, управлять погрешностью измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hillea P., Höhlera R., Stracka H.* A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 1994. – Vol. 44, Issue 2. – P. 95-102.
2. *Бобровников Н.Р., Яркин С.В., Гридин Ю.Н., Стрыгин В.Д., Чертов Е.Д.* Математическое обеспечение микропроцессорных преобразователей аналоговых пневматических сигналов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* – 2002. – № 2. – С. 36-39.
3. *Bartkovjak J., Karovičová M.* Approximation by Rational Functions // *Measurement Science Review.* – 2001. – Vol. 1, No. 1. – P. 63-65.
4. *Гутников В.С.* Тенденции развития электронных измерительных преобразователей для датчиков // *Приборы и системы управления.* – 1990. – № 10. – С. 32-35.
5. *Bluemm C. Weiss R. Weigel R. Brenk D.* Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling // *Industrial Electronics (ISIE). IEEE International Symposium.* 4-7 July 2010. – 2010. – P. 3356-3361.
6. *Gorbulnov S.F., Tsyplin B.V.* Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors // *Measurement Techniques.* – 2011. – Vol. 53, No. 10. – P. 1113-1117.
7. *Patra J.C. Chakraborty G. Meher P.K.* Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.* – 2008. – Vol. 55, Issue 5. – P. 1316-1327.
8. *Мухатаев Н.А.* Алгоритм линейризации и температурной компенсации характеристик преобразователей // *Матер. Третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления».* – Т. 2. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 74-76.
9. *Клевцов С.И., Линьков В.С.* Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления // *Матер. международной научной конференции "Анализ и синтез как методы научного познания". Ч. 2.* – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2004. – С. 8-15.
10. *Шапонич Д., Жигич А.* Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // *Приборы и техника эксперимента.* – 2001. – № 1. – С. 54-60.
11. *Клевцов С.И.* Пространственно-полиномиальные модели аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика // *Тр. международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы" (IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2004).* Научное издание в 3-х т. Т. 2. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004. – С. 309-314.
12. *Клевцов С.И.* Модели и методы построения прецизионных градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления // *Известия ТРТУ.* – 2007. – № 3. – С. 110-118.
13. *Клевцов С.И., Клевцова А.Б.* Мультисегментная пространственная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика // *Матер. международной научной конференции "Цифровые методы и технологии". Ч. 4.* – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2005. – С. 21-26.
14. *Пьявченко О.Н., Мокров Е.А., Панич А.Е., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Федоров А.Г., Удод Е.В.* Методы, модели, алгоритмы и архитектура прецизионных интеллектуальных датчиков давления. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 130 с.
15. *Клевцов С.И.* Особенности применения моделей градуировочных характеристик датчиков давления // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2008. – № 1 (78). – С. 25-26.
16. *Клевцов С.И., Удод Е.В.* Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // *Известия ТРТУ.* – 2005. – № 1. – С. 99-107.

17. Пьявченко О.Н. Клевцов С.И. Повышение точности обработки результатов измерения в интеллектуальных датчиках–измерителях физических сигналов // Электроника и системы управления. – 2006. – № 1. – С. 16-21.
18. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
19. Клевцов С.И. Мульти сегментная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – № 7. – С. 26-36.
20. Klevtsov and Y. Udod. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors // Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-5. – DOI: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.

REFERENCES

1. Hillea P., Höhlera R., Stracka H. A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, Vol. 44, Issue 2, pp. 95-102.
2. Bobrovnikov N.R., Yarkin S.V., Gridin Yu.N., Strygin V.D., Chertov E.D. Matematicheskoe obespechenie mikroprotsessornykh preobrazovateley analogovykh pnevmaticheskikh signalov [Mathematical support of microprocessor converters of analog pneumatic signals], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2002, No. 2, pp. 36-39.
3. Bartkovej J., Karovičová M. Approximation by Rational Functions, *Measurement Science Review*, 2001, Vol. 1, No. 1, pp. 63-65.
4. Gutnikov V.S. Tendentsii razvitiya elektronnykh izmeritel'nykh preobrazovateley dlya datchikov [Trends in the development of electronic measuring transducers for sensors], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1990, No. 10, pp. 32-35.
5. Bluemm C. Weiss R. Weigel R. Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling, *Industrial Electronics (ISIE). IEEE International Symposium. 4-7 July 2010*, pp. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsyplin B.V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors, *Measurement Techniques*, 2011, Vol. 53, No. 10, pp. 1113-1117.
7. Patra J.C. Chakraborty G. Meher P.K. Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, Vol. 55, Issue 5, pp. 1316-1327.
8. Mukhataev N.A. Algoritm linearizatsii i temperaturnoy kompensatsii kharakteristik preobrazovateley [Algorithm of linearization and temperature compensation of converter characteristics], *Mater. Tret'ey nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the Third scientific and practical conference "Perspective systems and control tasks"], Vol. 2. Taganrog: TTI YuFU, 2008, pp. 74-76.
9. Klevtsov S.I., Lin'kov V.S. Prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki datchika davleniya [Spatial approximation of the calibration characteristic of the pressure sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Analiz i sintez kak metody nauchnogo poznaniya»* [Materials of the international scientific conference "Analysis and synthesis as methods of scientific cognition"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2004, pp. 8-15.
10. Shaponich D., Zhigich A. Korrektsiya p'ezorezistivnogo datchika davleniya s ispol'zovaniem mikrokontrollera [Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 2001, No. 1, pp. 54-60.
11. Klevtsov S.I. Prostranstvenno-polinomial'nye modeli approksimatsii graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Spatial-polynomial models of approximation of the calibration characteristic of an intelligent sensor], *Tr. mezhdunarodnykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsiy "Intellektual'nye sistemy" (IEEE AIS'04) i "Intellektual'nye SAPR" (CAD-2004). Nauchnoe izdanie 3-kh t. T. 2* [Proceedings of the international scientific and technical conferences "Intelligent Systems" (IEEE AIS'04) and "Intelligent CAD" (CAD-2004). Scientific publications in 3 vol. Vol. 2]. Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2004, pp. 309-314.
12. Klevtsov S.I. Modeli i metody postroeniya pretsizionnykh graduirovochnykh kharakteristik intellektual'nykh datchikov davleniya [Models and methods for constructing precision calibration characteristics of intelligent pressure sensors], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2007, No. 3, pp. 110-118.

13. *Klevtsov S.I., Klevtsova A.B.* Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Multi-segment spatial model of the calibration characteristics of an intelligent sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "TSifrovye metody i tekhnologii"* [Materials of the international scientific conference "Digital methods and technologies"]. Part 4. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2005, pp. 21-26.
14. *P'yavchenko O.N., Mokrov E.A., Panich A.E., Klevtsov S.I., P'yavchenko A.O., Fedorov A.G., Udod E.V.* Metody, modeli, algoritmy i arkhitektura pretsizionnykh intellektual'nykh datchikov davleniya [Methods, models, algorithms and architecture of precision intelligent pressure sensors]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 130 p.
15. *Klevtsov S.I.* Osobennosti primeneniya modeley graduirovochnykh kharakteristik datchikov davleniya [Features of application of models of calibration characteristics of pressure sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 1 (78), pp. 25-26.
16. *Klevtsov S.I., Udod E.V.* Prostranstvennaya ploskostnaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika davleniya [Spatial planar model of the calibration characteristics of an intelligent pressure sensor], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 1, pp. 99-107.
17. *P'yavchenko O.N., Klevtsov S.I.* Povyshenie tochnosti obrabotki rezul'tatov izmereniya v intellektual'nykh datchikakh–izmeritelyakh fizicheskikh signalov [Improving the accuracy of processing measurement results in intelligent sensors–meters of physical signals], *Elektronika i sistemy upravleniya* [Electronics and control systems], 2006, No. 1, pp. 16-21.
18. *Semenov L.A., Siraya T.N.* Metody postroeniya graduirovochnykh kharakteristik sredstv izmereniy [Methods of construction of calibration characteristics of measuring instruments]. Moscow: Izd-vo standartov, 1986.
19. *Klevtsov S.I.* Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki mikroprotsessornogo datchika [Multi-segment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], *Metrologiya* [Metrology], 2011, No. 7, pp. 26-36.
20. *Klevtsov and Y. Udod.* Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.

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

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc; associate professor.

УДК 551.554

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-234-243

Г.В. Куповых, А.Г. Клово, В.В. Гривцов, О.В. Белоусова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НЕТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Представлена электродинамическая модель атмосферного приземного слоя, обусловленная действием электродного эффекта вблизи поверхности земли, и анализ ее уравнений методами теории подобия. Отдельно рассмотрены математические модели электрического состояния приземного слоя в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта. В математической постановке задач моделирования классического электродного слоя сделан ряд обоснованных физических допущений, позволивших получить аналитические решения уравнений. Получены аналитические формулы для расчетов профилей концентраций аэроионов, плотности объемного электрического заряда и напряженности электрического поля в электродном слое. В результате математического модели-

рования исследованы зависимости распределения электрических характеристик приземного слоя от значений электрического поля, степени ионизации воздуха и аэрозольного загрязнения атмосферы. Показано, что отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя практически постоянно. Усиление электрического поля, скорости ионизации воздуха и присутствие аэрозольных частиц достаточной концентрации приводит к уменьшению толщины электродного слоя и, как следствие, масштабов распределения его параметров. Повышение степени ионизации увеличивает, а увеличение концентрации аэрозольных частиц в атмосфере уменьшает значения плотности электрического заряда в приземном слое. Теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами численного моделирования электрической структуры приземного слоя. Полученные в работе аналитические формулы для расчетов электрических характеристик приземного слоя и результаты вычислений могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга электрического состояния атмосферы.

Математическое моделирование; электродинамика; приземный слой; атмосфера; электродный эффект; электрическое поле; аэроионы; ионизация; аэрозоль.

G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, V.V. Gritsov, O.V. Belousova

MODELING OF THE NON-TURBULENT SURFACE LAYER ELECTRODYNAMIC STRUCTURE

The article presents an electrodynamic model of the atmospheric surface layer caused by the action of the electrode effect near the earth's surface, and an analysis of its equations by methods of similarity theory. Mathematical models of the surface layer electrical state in the approximations of the classical and turbulent electrode effect are considered separately. In the mathematical formulation of modeling problems, a number of well-founded physical assumptions were created that made it possible to obtain analytical solutions to the equations. Analytical formulas have been obtained for calculating the profiles of aeroion concentrations, the density of the space electric charge and the electric field in the electrode layer. As a result of mathematical modeling, the dependences of the electrical characteristics distribution in the surface layer on the values of the electric field, the degree of air ionization and aerosol pollution of the atmosphere are investigated. It is shown that the ratio of the electric field values on the earth's surface and at the upper boundary of the electrode layer is almost constant. The increasing of the electric field, the rate of air ionization and the presence of sufficient concentration aerosol particles leads to a decrease in the thickness of the electrode layer and, as a consequence, the scale of distribution of its parameters. An amplification in the degree of ionization increases, and an increase in the concentration of aerosol particles in the atmosphere decreases the values of the electric charge density in the surface layer. Theoretical calculations are in good agreement with experimental data and the results of numerical modeling of the surface layer electrical structure. The analytical formulas obtained in the work for calculating the electrical characteristics of the surface layer and the results of calculations can be useful in solving a number of applied problems of geophysics, in particular for monitoring the electrical state of the atmosphere.

Mathematical modeling; electrodynamics; surface layer; atmosphere; electrode effect; electric field; aeroions; ionization; aerosol.

Введение. Электродинамическое состояние приземного слоя атмосферы определяется глобальным электрическим полем, а также локальным действием электродного эффекта вблизи поверхности земли. Последний зависит от метеорологических условий, ионизации воздуха, степени аэрозольного и радиоактивного загрязнений. Известно много электродинамических моделей приземного слоя, основанных на теории электродного эффекта в атмосфере, и имеются результаты их численных расчетов [1–4]. Для практических оценок электрического состояния атмосферы представляют интерес аналитические выражения, следующие из уравнений электродного эффекта с некоторыми обоснованными физическими допущениями.

Постановка задачи моделирования. Основной задачей электродинамики приземного слоя атмосферы является нахождение пространственно-временных распределений электрических характеристик: концентраций полярных аэроионов ($n_{1,2}$) и электрического поля (E) в различных условиях, а также плотности объемного заряда, плотности электрического тока и т.д.

Электродинамическая модель горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя атмосферы в приближении электродного эффекта [3, 4] состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений и уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) = q - \alpha n_1 n_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2)$$

где $b_{1,2}$ – подвижности полярных аэроионов, α – коэффициент рекомбинации, $D_T = D_j z$ – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов, q – скорость ионизации воздуха, e – элементарный заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Для исследования математической модели (1) используем методы теории подобия. Введем безразмерные переменные, используя характерные значения и масштабы входящих в них физических величин:

$$t' = t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \quad n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2}. \quad (2)$$

Тогда получаем уравнения в безразмерной форме:

$$\frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2).$$

Знак « ∞ » означает верхнюю границу (z_∞) электродного слоя. Характерное время протекания метеорологических процессов в атмосфере $T \sim 1-3$ ч, тогда как время релаксации для аэроиона - $\tau = 300$ с ($q_\infty = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$). Поэтому далее будем рассматривать стационарные модели. Систему (3) характеризуют два безразмерных параметра (критерии подобия):

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = \frac{e}{\epsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1. \quad (4)$$

Когда параметр $\xi_{1,2} \geq 1$, имеет место классический электродный эффект [5–7], то есть пространственно-временное распределение аэроионов в приземном слое обусловлено только электрическими силами. Если $\xi_{1,2} < 1$, имеет место турбулентный электродный эффект: перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха [8–10]. Если $\xi_{1,2} \ll 1$, имеет место приближение сильного турбулентного перемешивания, когда перенос аэроионов осуществляется только турбулентной диффузией [1, 2].

Далее во всех модельных случаях будем предполагать выполненным условие $|\gamma| \ll 1$, тогда электрическое поле, создаваемое объёмным зарядом, можно считать постоянным.

Модель классического электродного слоя свободного от аэрозоля. Как следует из теории электродного эффекта (при условии $\xi_{1,2} \geq 1$) профиль концентрации положительных ионов проводимости практически не зависит от высоты

($n_1 \approx const$) [2, 5, 7]. Для получения аналитических решений сделаем следующие физические допущения: $E = const$, $q = const$. Тогда, рассмотрим уравнение только для концентрации отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием:

$$\begin{aligned} -b_2 E \frac{dn_2}{dz} &= q - \alpha n_1 n_2, \\ n_2(z=0) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решением (5) является выражение, описывающее распределение отрицательных аэроионов по высоте:

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E}\right) \right). \quad (6)$$

Плотность электрического заряда, создаваемого ионами проводимости, может быть рассчитана по формуле:

$$\rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)). \quad (7)$$

Тогда получаем:

$$\rho(z) = e \left(n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E}\right) \right) \right). \quad (8)$$

Для расчета напряжённости электрического поля, как следует из теории классического электродного эффекта [2, 5, 7], воспользуемся тем, что плотность электрического тока проводимости (j) не меняется по высоте, а значение можно рассчитать по закону Ома, используя формулу для проводимости воздуха (λ):

$$j = \lambda \cdot E, \quad \lambda = e(b_1 n_1 + b_2 n_2), \quad (9)$$

где $n_{1,2} = (q/\alpha)^{1/2}$ асимптотические значения на верхней границе электродного слоя [2].

Тогда для расчета напряженности электрического поля имеем формулу:

$$E(z) = j/\lambda(z), \quad (10)$$

где $\lambda(z)$ рассчитывается аналогично (9), но на соответствующей высоте. Для расчётов параметры модели задавались следующими параметрами: $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Результаты расчетов характеристик классического электродного слоя в зависимости от интенсивности электрического поля и степени ионизации воздуха представлены на рис. 1-2.

Во всех случаях электродный эффект E_0/E_∞ (отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя) практически одинаков, что согласуется с численными моделями [2, 5, 6, 16]. Усиление электрического поля приводит к уменьшению толщины электродного слоя, масштабов распределения и, следовательно, значений напряжённости поля и плотности объемного заряда. Увеличение скорости ионизации воздуха также уменьшает толщину электродного слоя, но при этом увеличиваются значения плотности электрического заряда.

Следует отметить, что проведенные теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными [13, 18].

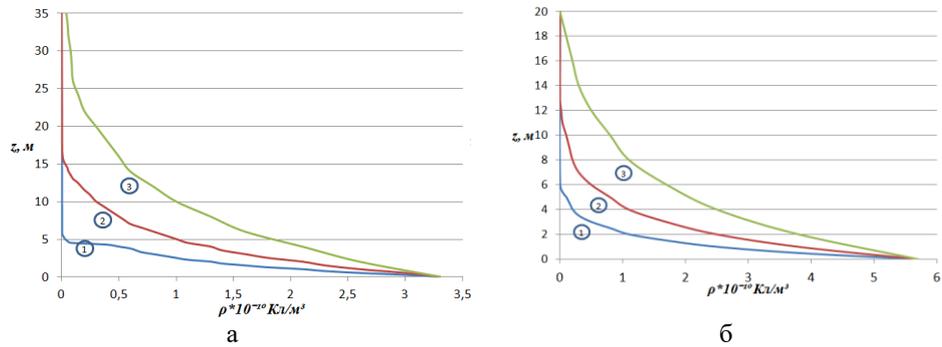


Рис. 1. Плотность объемного заряда в электродном слое ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

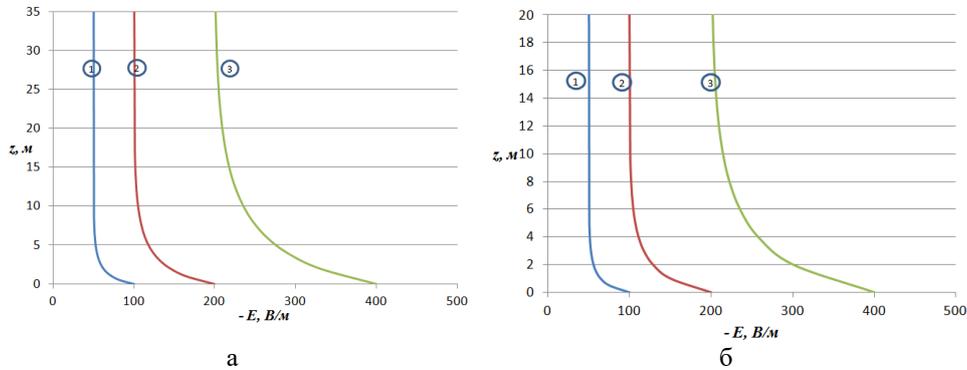


Рис. 1. Электрическое поле в электродном слое ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

Модель классического электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения. Предположим, что приземный слой заполнен однократно заряженными монодисперсными аэрозольными частицами. В правой части ионизационно-рекомбинационных уравнений, добавим член, описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем в виде $BNn_{1,2}$, что оправдано отсутствием переноса тяжелых ионов [7, 11, 12, 14, 15]. Для концентраций аэрозольных частиц сопоставимых или превышающих значения для аэроионов рекомбинацией можно пренебречь [7, 12]. Здесь $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$ – параметр, зависящий от коэффициентов взаимодействия

легких ионов, нейтральных и заряженных аэрозольных частиц, N – полная концентрация аэрозольных частиц, $\eta_{1,2}$ – коэффициенты воссоединения полярных аэроионов с аэрозольными частицами ($\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$).

С учетом сделанных выше допущений, рассмотрим уравнение для концентрации отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием:

$$-b_2 E \frac{dn_2}{dz} = q - BNn_{1,2}, \quad n_2(z=0) = 0. \tag{11}$$

Решением (11) является выражение, описывающее распределение отрицательных аэроионов по высоте:

$$n_2(z) = \frac{q}{BN} \left(1 - \exp\left(\frac{BN}{b_1 E} z\right) \right). \quad (12)$$

Распределение плотности электрического заряда, создаваемого аэроионами, может быть рассчитано по формуле (7) и равно:

$$\rho(z) = e \left(n_1 - \frac{q}{BN} \left(1 - \exp\left(\frac{BN}{b_1 E} z\right) \right) \right). \quad (13)$$

Профили плотности объемного заряда в классическом электродном слое при различных значениях концентраций аэрозольных частиц, напряженности электрического поля и скорости ионизации воздуха представлены на рис. 3-4.

Наличие аэрозольных частиц в атмосфере приводит к уменьшению высоты электродного слоя и плотности электрического заряда в нем. Увеличение ионизации, как и усиление электрического поля приводит к увеличению плотности объемного заряда вблизи поверхности земли, но в меньшей степени, чем в чистой атмосфере.

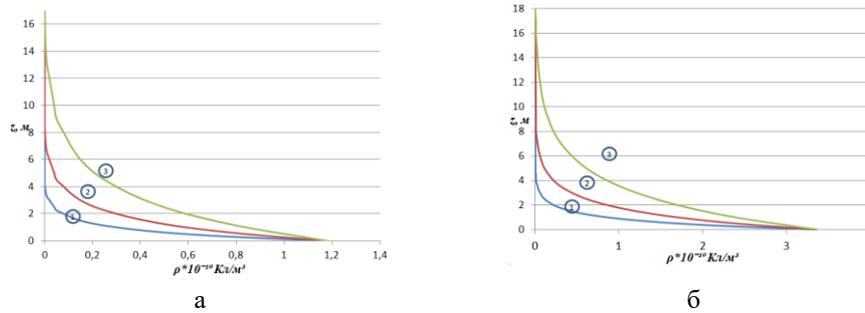


Рис. 3. Плотность объемного заряда в электродном слое с аэрозолем концентрацией $N = 8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $2 - E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

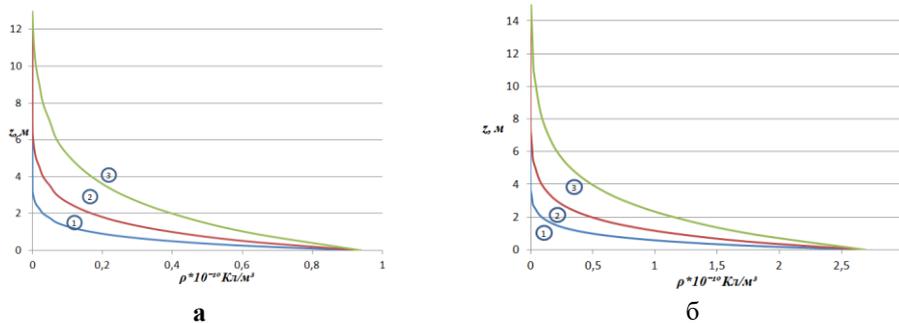


Рис. 4. Плотность объемного заряда в электродном слое с аэрозолем концентрацией $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $2 - E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

Для расчета профиля напряжённости электрического поля воспользуемся формулами (9) и (10) с учетом того, что для системы (11) асимптотические значения концентраций аэроионов на верхней границе электродного слоя изменяются и становятся равны $n_{1,2} = \frac{q}{BN}$. Результаты расчетов для различных значений параметров электродного слоя приведены на рис. 5, 6.

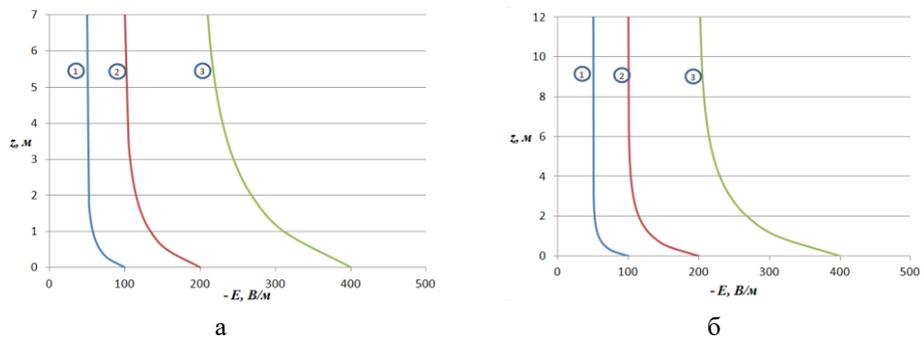


Рис. 5. Электрическое поле в классическом электродном слое с аэрозолем концентрацией $N=8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

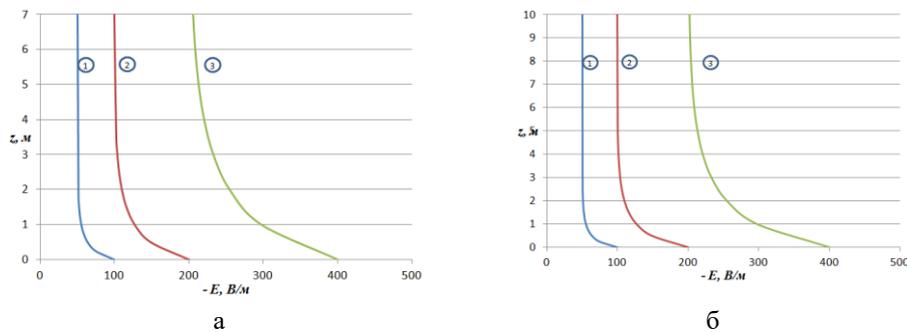


Рис. 6. Электрическое поле в классическом электродном слое с аэрозолем концентрацией $N=8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

В условиях аэрозольного загрязнения масштаб распределения напряжённости электрического поля уменьшится с увеличением концентрации частиц, тогда как электродный эффект E_0/E_∞ во всем электродном слое почти не меняется.

Заключение. Для оценки электрического состояния атмосферы и на основании теории электродного эффекта сделаны обоснованные физические допущения и построены упрощенные модели классического электродного слоя в чистой атмосфере и при наличии в ней аэрозольных частиц. Получены аналитические решения, описывающие распределения концентраций ионов проводимости, плотности объемного заряда и электрического поля, в зависимости от степени ионизации воздуха и его аэрозольного загрязнения. Полученные приближенные аналитические решения хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными и могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга состояния атмосферы [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеониздат, 1991. – С. 394-408.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.

3. *Куповых Г.В.* Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
4. *Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141.
5. *Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect // Journal Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1967. – Vol. 29, No. 6. – P. 709-721.
6. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 43-46.
7. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С.* Приближенное аналитическое решение задачи об электродинамическом состоянии приземной атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2018. – № 2. – С. 84-89.
8. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Электродинамическая модель атмосферного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8. – С. 93-106.
9. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: Planetary Electrodynamics, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; ed.: Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969. – P. 167-181.
10. *Куповых Г.В.* Электричество приземного слоя // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 1995. – № 4. – С. 32-34.
11. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Генерация объемного заряда вблизи поверхности земли с учетом взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 81-85.
12. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Математическое моделирование электродинамической структуры приземного слоя атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С. 192-200.
13. *Куповых Г.В., Болдырев А.С., Литвинова И.С., Марченко А.Г.* О связи электрического поля с объемным зарядом в приземном слое атмосферы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение № 3. – 2003. – С. 42-45.
14. *Hoppel W.A., Frick G.M.* Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // Aerosol Science and Technology. – 1986. – 5:1. – P. 1-21.
15. *Hoppel W.A.* Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols // J. Geoph. Res. – 1985. – Vol. 90, No. D4. – P. 5917-5923.
16. *Куповых Г.В., Редин А., Болдырев А.* Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // Journal of Electrostatics 71. Elsevier B.V. – 2013. – P. 305-311.
17. *Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Клово А. Г., Кудринская Т.В.* Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698 044034. – 8 p.
18. *Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А.* Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 4 – С. 77-85.
19. *Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В.* Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинимических процессов. – СПб.: РГТМУ, 2015. – 206 с.
20. *Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Гривитов В.В.* The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. 913 052041. – 6 p.

REFERENCES

1. *Morozov V.N.* Atmosfernoe elektrichestvo [Atmospheric electricity], *Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli)* [Atmosphere. Reference book (reference data, models)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 394-408.
2. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Teoriya elektrodnoogo efekta v atmosphere [Theory of the electrode effect in the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.

3. Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskie protsessy v prizemnom sloe atmosfery [Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 114 p.
4. Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G. Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141.
5. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect, *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, Vol. 29, No. 6, pp. 709-721.
6. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Klassicheskiy (neturbulentnyy) elektroodnyy effekt v prizemnom sloe [Classical (non-turbulent) electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2003, No. 2, pp. 43-46.
7. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V., Svidel'skiy S.S. Priblizhennoe analiticheskoe reshenie zadachi ob elektrodinamicheskom sostoyanii prizemnoy atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Approximate analytical solution to the problem of the electrodynamic state of the surface atmosphere in aerosol pollution conditions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2018, No. 2, pp. 84-89.
8. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskaya model' atmosfernogo prizemnogo sloya [Electrodynamic model of the atmospheric surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 8, pp. 93-106.
9. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement, In: *Planetary Electrodynamics, 2*, S.C. Coroniti and J. Hughes, ed.: Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969, pp. 167-181.
10. Kupovykh G.V. Elektrichestvo prizemnogo sloya [Electricity of the surface layer], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions, Sev.-Kav. reg., Estest. Sciences], 1995, No. 4, pp. 32-34.
11. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V., Morozov V.N. Generatsiya ob'emnogo zaryada vblizi poverkhnosti zemli s uchedom vzaimodeystviya aerazol'nykh chastits s aeroionami [Generation of volumetric charge near the earth's surface, taking into account the interaction of aerosol particles with aeroions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Spetsvypusk. Fizika atmosfery* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Special issue. Atmospheric physics], 2010, pp. 81-85.
12. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V. Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury prizemnogo sloya atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Mathematical modeling of the electrodynamic structure of the surface layer of the atmosphere under aerosol pollution conditions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 7 (96), pp. 192-200.
13. Kupovykh G.V., Boldyrev A.S., Litvinova I.S., Marchenko A.G. O svyazi elektricheskogo polya s ob'emnym zaryadom v prizemnom sloe atmosfery [On the connection of an electric field with a volumetric charge in the surface layer of the atmosphere], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Prilozhenie № 3* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Appendix No. 3], 2003, pp. 42-45.
14. Hoppel W.A., Frick G.M. Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment, *Aerosol Science and Technology*, 1986, 5:1, pp. 1-21.
15. Hoppel W.A. Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols, *J. Geoph. Res.*, 1985, Vol. 90, No. D4, pp. 5917-5923.
16. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics 71*. Elsevier B.V., 2013, pp. 305-311.
17. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698 044034, 8 p.
18. Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Redin A.A. Issledovaniya ionizatsionnogo sostoyaniya prizemnogo sloya atmosfery v raznykh geofizicheskikh usloviyakh [Studies of the ionization state of the surface layer of the atmosphere in different geophysical conditions], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2018, No. 4, pp. 77-85.

19. *Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. Razvitie metodov i sredstv prikladnoy geofiziki – atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov [Development of methods and means of applied geophysics - atmospheric and electrical monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes]. Saint Petersburg: RGGMU, 2015, 206 p.*
20. *Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Gritsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 913 052041, 6 p.*

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

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гривцов Владимир Владиславович – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Белюсова Ольга Васильевна – e-mail: obelousova@sfedu.ru, тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, ассистент.

Kupovkh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of weisssch mathematics, department; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of vyshinsky mathematics;cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Gritsov Vladimir Vladislavovich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371794; the department of engineering graphics and computer design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Belousova Olga Vasilievna – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of the highest mathematician; assistant.

УДК 621.373.1

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-243-254

А.М. Пилипенко, А.В. Агабекян

МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В SPICE-СИМУЛЯТОРАХ

В настоящее время задача разработки методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области остается актуальной, поскольку известные методы Гира и трапеций, использующиеся в SPICE-симуляторах, имеют ряд существенных недостатков. Для оценки эффективности новых численных методов необходимы специальные тестовые задачи, позволяющие определить точность методов в различных режимах работы. Численный анализ автоколебательных цепей во временной области представляет наибольшие трудности для программ схемотехнического моделирования (SPICE-симуляторов), поскольку модели таких цепей могут быть осциллирующими и жесткими одновременно. Целью данной работы является создание модели автоколебательной цепи, позволяющей количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. В соответствии с поставленной целью в работе были решены следующие задачи: исследованы особенности численного анализа классических моделей автогенераторов в SPICE-симуляторах; описана обобщенная математическая модель автоколебательных цепей; предложена универсальная схемная модель автоколебательных цепей для SPICE-симуляторов; проведена количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. Предлагаемая в дан-

ной работе модель позволяет определить относительные погрешности численных методов в режиме гармонических колебаний, в режиме релаксационных колебаний, а также в «смешанном» режиме, при котором отклик цепи содержит как экспоненциальные составляющие с различной скоростью изменения, так и квазигармонические составляющие. Полученные результаты подтверждают высокую точность метода трапеций в режиме гармонических колебаний, а метода Гира – в режиме релаксационных колебаний. Относительные погрешности определения амплитуды колебаний с помощью данных методов для соответствующих режимов работы не превышают 3%. В то же время в «смешанном» режиме работы относительные погрешности определения амплитуды колебаний для обоих методов могут достигать 100%, что подтверждает необходимость применения дополнительных опций или специальных методов численного анализа в SPICE-симуляторах.

Автогенератор; гармонические колебания; релаксационные колебания; обыкновенные дифференциальные уравнения; погрешность решения.

A.M. Pilipenko, A.V. Agabekyan

MODEL OF SELF-OSCILLATING CIRCUIT FOR TESTING NUMERICAL METHODS OF TRANSIENT ANALYSIS IN SPICE-SIMULATORS

At present time the problem of developing methods for numerical analysis of RF circuits in the time domain remains actual because the known Gear and trapezoidal methods used in SPICE simulators have a number of significant disadvantages. To evaluate the effectiveness of new numerical methods, special test problems are needed to determine the accuracy of methods in various operating modes. Numerical analysis of self-oscillating circuits in the time domain offers the most difficulties for circuit simulation programs (SPICE-simulators) since models of self-oscillating circuits can be both oscillatory and stiff simultaneously. The aim of this work is to create the model of a self-oscillating circuit that allows to quantify the accuracy of numerical methods. In accordance with the aim, the following problems are solved: the features of the numerical analysis of classical self-oscillators in SPICE-simulators are investigated; the generalized mathematical model of self-oscillating circuits is described; the universal circuit model of self-oscillating circuits for SPICE-simulators is presented; the quantitative accuracy assessment of numerical methods of transient analysis in SPICE-simulators was carried out. The model proposed in this paper makes it possible to determine the relative errors of numerical methods in the harmonic oscillations mode, in the relaxation oscillations mode, as well as in the «mixed» mode, when the circuit response contains both exponential components with different rates of change and quasi-harmonic components. The obtained results confirm the high accuracy of the trapezoidal method in the mode of harmonic oscillations, and the Gear method in the mode of relaxation oscillations. The relative errors in determining the amplitude of oscillation using these methods for the corresponding operating modes do not exceed 3%. At the same time, in the «mixed» mode, the relative errors in determining the amplitude of oscillation for both methods can reach 100%, that confirms the need to use additional options or special methods of numerical analysis in SPICE-simulators.

Self-oscillator; harmonic oscillations; relaxation oscillations; ordinary differential equations; solution error.

Введение. В настоящее время продолжается разработка методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области для пакетов схемотехнического моделирования (SPICE-симуляторов) [1–4]. Актуальность проблемы разработки новых методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области связана с тем, что используемые в SPICE-симуляторах методы трапеций и Гира позволяют решать осциллирующие или жесткие задачи соответственно, в то время как модели автоколебательных цепей могут быть осциллирующими и жесткими одновременно [5–7]. Важным этапом разработки численных методов является их тестирование при решении специальных задач. При тестировании численного метода необходимо определить как качественную, так и количественную оценку точности полученного решения.

Для достоверной количественной оценки точности численного решения тестовой задачи необходимо знать ее аналитическое решение. В общем случае аналитическое решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) автоколе-

бательных цепей определить не удастся, однако, в частных случаях, при использовании кубической или кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента автогенератора возможно получение аналитического решения [8, 9].

Целью данной работы является создание модели автоколебательной цепи, позволяющей количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- ◆ исследование особенностей численного анализа классических моделей автогенераторов в SPICE-симуляторах;
- ◆ описание обобщенной математической модели автоколебательной цепи в виде обыкновенного дифференциального уравнения с известным аналитическим решением в различных режимах работы;
- ◆ разработка универсальной схемной модели автоколебательной цепи для SPICE-симуляторов;
- ◆ количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах с помощью предложенной модели.

1. Численный анализ классических моделей автогенераторов. Классические схемы автоколебательных цепей, генерирующих гармонические и релаксационные колебания описаны, например, в работах [10] и [11]. На рис. 1 представлены классические схемы автогенераторов, реализованные в популярном SPICE-симуляторе NI Multisim [12]. Схема на рис. 1,а представляет собой генератор гармонических колебаний с автотрансформаторной обратной связью, а схема на рис. 1,б – генератор релаксационных колебаний, также называемый симметричным мультивибратором.

Параметры моделей пассивных элементов и источников постоянного напряжения рассматриваемых генераторов указаны непосредственно на рис. 1, параметры трансформатора T1 и биполярных транзисторов Q1, Q2 приведены в работе [13].

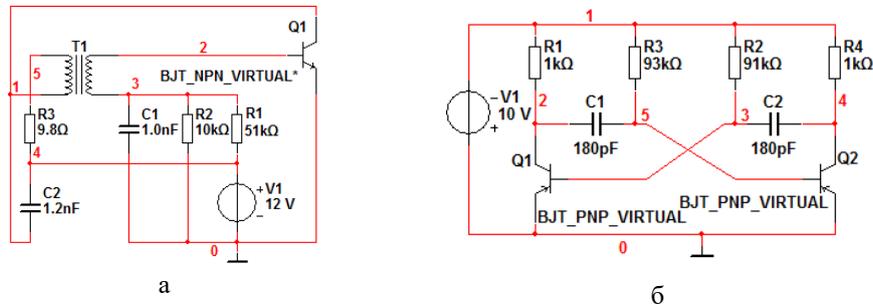


Рис. 1. Схемы автогенераторов, реализованные в NI Multisim:
а – генератор гармонических колебаний, б – генератор релаксационных колебаний

На рис. 2 представлены временные диаграммы напряжения на выходе генератора гармонических колебаний u_{C2} , полученные в симуляторе NI Multisim методами трапеций и Гира при выбранных «по умолчанию» настройках временного шага и точности решения (автоматический выбор величины шага, предельно допустимая относительная погрешность решения $REL TOL = 10^{-3}$). На рис. 3 приведены аналогичные результаты, полученные в симуляторе NI Multisim для генератора релаксационных колебаний.

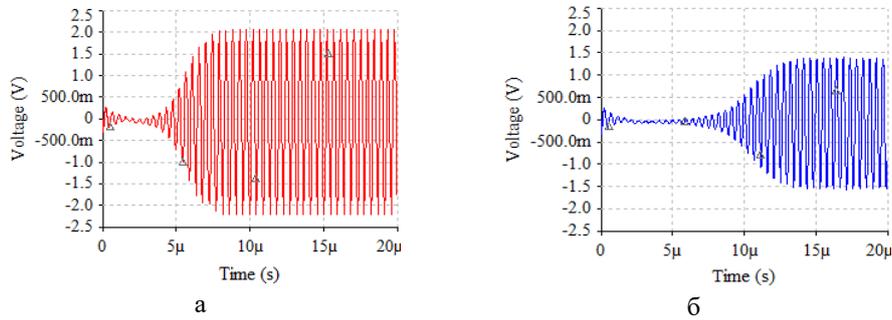


Рис. 2. Временные диаграммы напряжения на выходе генератора гармонических колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

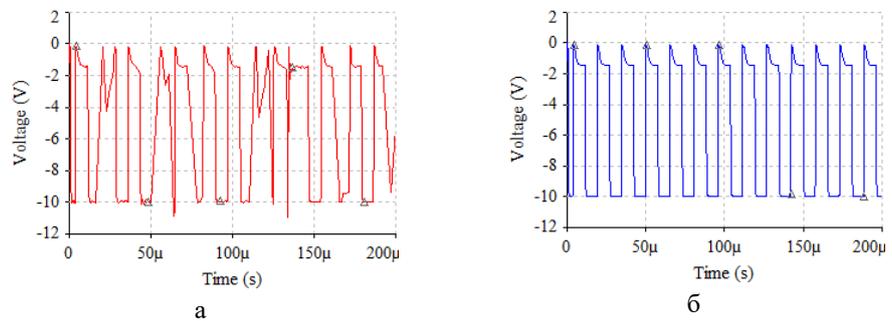


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения на выходе генератора релаксационных колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

Как видно из рис. 2 и 3 численные решения, полученные разными методами для рассматриваемых автогенераторов, существенно отличаются. Так для генератора гармонических колебаний, напряжение на выходе, полученное методом Гира, отличается от напряжения, полученного методом трапеций примерно в два раза по амплитуде и времени установления стационарного режима. Для генератора релаксационных колебаний численные решения отличаются не только по амплитуде, но и по характеру колебаний: при использовании метода Гира напряжение на выходе имеет вид периодической последовательности импульсов, а при использовании метода трапеций периодичность импульсов нарушается, между импульсами наблюдаются осцилляции и выбросы.

В рассмотренных выше примерах количественная оценка точности полученных результатов невозможна, так как аналитические решения уравнений соответствующих автогенераторов неизвестны. Для проверки достоверности полученных результатов численного анализа необходимо уменьшать предельно допустимую относительную погрешность решения *RELTOL* в настройках SPICE-симулятора.

Для генератора гармонических колебаний при уменьшении *RELTOL* в 10 и 100 раз по сравнению со значением, установленным «по умолчанию» численное решение, полученное методом Гира, приближается к решению, полученному методом трапеций, в то же время изменения вида решения для метода трапеций при уменьшении *RELTOL* практически незаметны. Для генератора релаксационных колебаний при уменьшении *RELTOL* в 10 и 100 раз по сравнению со значением, установленным «по умолчанию», наблюдается обратная ситуация – численное решение, полученное методом трапеций, приближается к решению, полученному методом Гира, в то время как изменения вида решения для метода Гира при уменьшении *RELTOL* практически незаметны.

Полученные выше результаты моделирования классических автогенераторов показывают, что для численного анализа генератора гармонических колебаний, описывающегося осциллирующей системой ОДУ, наиболее эффективен метод трапеций, а для численного анализа генератора релаксационных колебаний, описывающегося жесткой системой ОДУ, – метод Гира. К сожалению, достоверная количественная оценка точности полученных выше результатов численного анализа автогенераторов невозможна, поэтому далее рассматривается модель автоколебательной цепи, для которой известно аналитическое выражение для выходного напряжения.

2. Обобщенная математическая модель автоколебательной цепи. Обобщенная математическая модель автоколебательной цепи может быть получена на основании простейшей схемы замещения автогенератора, показанной на рис. 4.

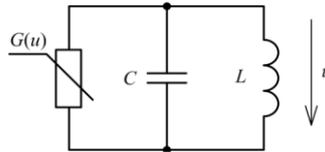


Рис. 4. Схема замещения автогенератора

Схема на рис. 4 включает в себя линейные емкость C и индуктивность L , а также нелинейный резистивный элемент, дифференциальная проводимость которого $G(u)$ имеет как положительные, так и отрицательные значения.

Математическая модель автоколебательной цепи, представленной на рис. 4, имеет вид ОДУ второго порядка [14]:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{1}{C} \frac{df(u)}{du} \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0, \quad (1)$$

где u – напряжение на выходе автогенератора; t – время; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота LC -контура; $f(u)$ – ВАХ нелинейного резистивного элемента.

Аналитическое решение уравнения (1) может быть получено при использовании кубической или кусочно-линейной аппроксимации функции $f(u)$.

При использовании кубической аппроксимации уравнение (1) также называют уравнением Ван-дер-Поля [15]. Аналитическое решение уравнения Ван-дер-Поля требует значительных вычислительных затрат, особенно в режиме релаксационных колебаний [8]. Кроме того, кубическая аппроксимация в большинстве случаев не позволяет описать ВАХ нелинейного элемента с достаточной точностью.

В данной работе предлагается использовать кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ нелинейного элемента, которая описывается следующим выражением [16]:

$$f(u) = \begin{cases} G_1(u + 2U_0), & u < -U_0; \\ -G_0u, & -U_0 \leq u \leq U_0; \\ G_1(u - 2U_0), & u > U_0, \end{cases} \quad (2)$$

где G_0 и G_1 – модули дифференциальной проводимости нелинейного элемента при $df/du < 0$ и $df/du > 0$ соответственно; $\pm U_0$ – значения напряжения, при которых df/du меняет знак на противоположный.

Методика получения аналитического решения уравнения (1) при использовании кусочно-линейной аппроксимации ВАХ нелинейного элемента в установившемся режиме представлена работе [9]. Вид аналитического решения уравнения (1) будет зависеть от отношений характеристической проводимости LC -контура $\sigma = \sqrt{C/L}$ и модулей дифференциальной проводимости:

$$q = \sigma / G_0; \quad Q = \sigma / G_1.$$

В случае $q > 1/2$ и $Q > 1/2$ в рассматриваемой цепи имеет место режим колебаний близких по форме к гармоническим и установившееся аналитическое решение уравнения (1) на интервале времени $0 \leq t \leq T/2$ будет описываться квазигармоническими функциями:

$$u(t) = \begin{cases} A_0 e^{\delta_0 t} \cos(\omega_{св0} t + \psi_0), & 0 \leq t \leq t_0; \\ A_1 e^{-\delta_1 t} \cos(\omega_{св1} t + \psi_1), & t_0 < t \leq T/2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\omega_{св0,1} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_{0,1}^2}$; $\delta_0 = G_0/2C$; $\delta_1 = G_1/2C$; A_0, A_1, ψ_0, ψ_1 – постоянные интегрирования; t_0 – момент времени, в который дифференциальная проводимость нелинейного элемента меняет знак; T – период колебаний.

В случае $q < 1/2$ и $Q < 1/2$ в рассматриваемой цепи имеет место режим релаксационных колебаний и установившееся аналитическое решение уравнения (1) на интервале времени $0 \leq t \leq T/2$ описывается суммой двух экспоненциальных функций:

$$u(t) = \begin{cases} a_1 e^{t/\tau_1} + a_2 e^{t/\tau_2}, & 0 \leq t \leq t_0; \\ a_3 e^{-t/\tau_3} + a_4 e^{-t/\tau_4}, & t_0 < t \leq T/2, \end{cases} \quad (4)$$

где $\tau_{1,2} = (\delta_0 \pm \sqrt{\delta_0^2 - \omega_0^2})^{-1}$ и $\tau_{3,4} = |-\delta_1 \pm \sqrt{\delta_1^2 - \omega_0^2}|^{-1}$ – постоянные времени автогенератора; a_1, a_2, a_3, a_4 – постоянные интегрирования.

Следует отметить, что при $q > 1/2$ и $Q < 1/2$ установившееся аналитическое решение уравнения (1) будет содержать как квазигармоническую составляющую, так и экспоненциальную, поэтому далее такой режим работы автогенератора будем называть «смешанным»:

$$u(t) = \begin{cases} A_0 e^{\delta_0 t} \cos(\omega_{св0} t + \psi_0), & 0 \leq t \leq t_0; \\ a_3 e^{-t/\tau_3} + a_4 e^{-t/\tau_4}, & t_0 < t \leq T/2. \end{cases} \quad (5)$$

Поскольку ВАХ нелинейного элемента является нечетной функцией аналитическое решение на второй половине периода $T/2 \leq t \leq T$ определяется следующим образом: $u(t) = -u(t - T/2)$.

Установившееся аналитическое решение в произвольный момент времени определяется на основании решения полученного на интервале времени $0 \leq t \leq T$ из условия периодичности: $u(t) = u(t \pm nT)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Количественную оценку точности полученных численных решений удобно проводить на основании относительных погрешностей расчета основных параметров выходного напряжения, которыми являются амплитуда и период колебаний. Без потери общности полученных результатов далее будем полагать $L = 1$ Гн, $C = 1$ Ф. Данные параметры цепи определяют период колебаний на выходе автогенератора и соответственно время анализа цепи, но для оценки эффективности численного метода имеет значение отношение времени анализа t_a к временному шагу решения h , а не абсолютные значения указанных величин.

Параметры аналитического решения, в соответствии с методикой приведенной в работе [9], определяются с точностью до последнего знака разрядной сетки компьютера. Ниже представлены параметры аналитических решений, полученные для различных режимов работы автогенератора:

- ◆ режим гармонических колебаний $q = Q = 100$

$$A_m = 2,475416990116814 \text{ В}, T = 6,283212578195301 \text{ с};$$

- ◆ режим релаксационных колебаний $q = 0,25, Q = 0,01$

$$A_m = 1,084334602144661 \text{ В}, T = 18,16115240463717 \text{ с};$$

- ♦ «смешанный» режим работы $q = 10$, $Q=0,005$

$$A_m = 1,002862707954253 \text{ В}, T = 6,379517383846021 \text{ с.}$$

3. Универсальная модель автоколебательной цепи для SPICE-симуляторов. Универсальная схемная модель автоколебательной цепи, позволяющая проводить численный анализ физических процессов в различных режимах работы с помощью SPICE-симуляторов, может быть построена на основе схемы замещения автогенератора, показанной на рис. 4.

В качестве нелинейной проводимости в SPICE-симуляторах, как правило, используется источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). В пакете NI Multisim отсутствует модель ИТУН с кусочно-линейной характеристикой, поэтому для реализации указанного источника в данной работе предлагается использовать источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН) с кусочно-линейной передаточной характеристикой (Voltage-Controlled Piecewise Linear Source – PWL) совместно с линейным источником тока, управляемым напряжением (Voltage-Controlled Current Source), как показано на рис. 5. Полагая, что передаточная проводимость линейного ИТУН равна 1 См (1 Mho) нетрудно показать, что ток i на его выходе будет определяться кусочно-линейной функцией, численно равной характеристике ИНУН, которую, в свою очередь можно представить в виде функции (2), таким образом $i = f(u)$.

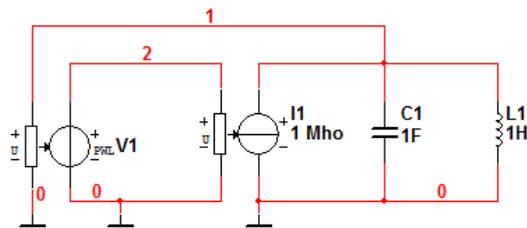


Рис. 5. Универсальная схемная модель автогенератора для SPICE-симуляторов

На рис. 6–8 приведены временные диаграммы напряжений, полученные в симуляторе NI Multisim методами трапеций и Гира для различных режимов работы универсальной модели автогенератора при выбранных «по умолчанию» настройках временного шага и точности решения. Для уменьшения влияния переходных процессов начальное значение выходного напряжения полагалось равным точному значению амплитуды колебаний, полученной для соответствующего режима работы.

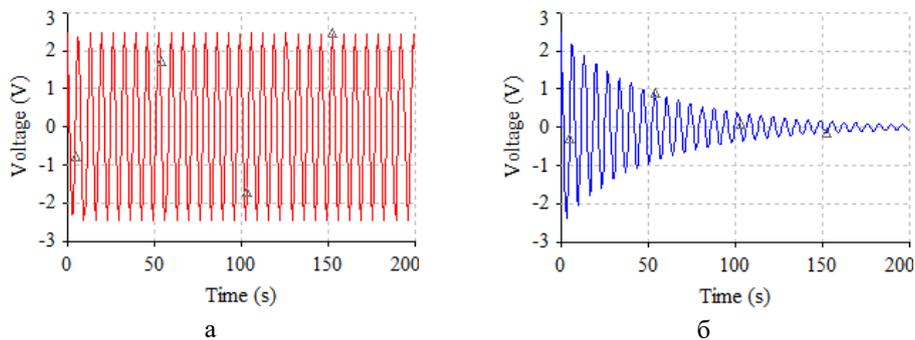


Рис. 6. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в режиме гармонических колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

Результаты, представленные на рис. 6 и 7, подтверждают недостатки методов трапеций и Гира, которые были выявлены ранее при численном анализе классических автогенераторов. В частности, численное решение, полученное методом Гира для случая гармонических колебаний, и численное решение, полученное методом трапеций для случая релаксационных колебаний, качественно не соответствуют реальным физическим процессам.

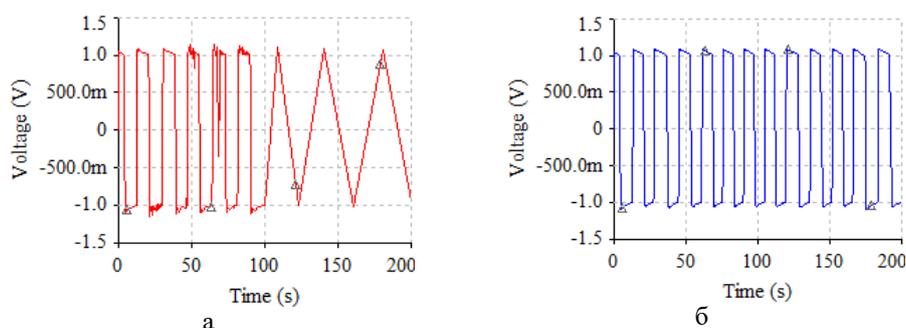


Рис. 7. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в режиме релаксационных колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

В «смешанном» режиме работы, при котором модель автогенератора является осциллирующей и жесткой одновременно, полученные численные решения как для метода трапеций, так и для метода Гира (см. рис. 8) существенно отличаются от аналитического решения, показанного на рис. 9, как по амплитуде и периоду колебаний, так и по характеру изменения физических процессов.

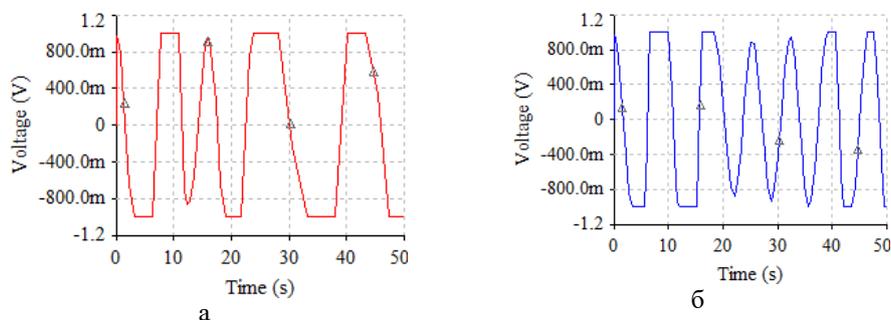


Рис. 8. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в «смешанном» режиме, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

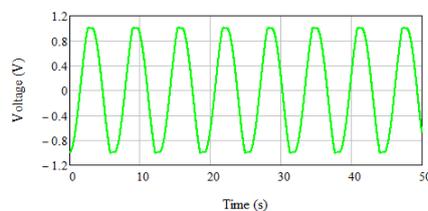


Рис. 9. Временная диаграмма аналитического решения уравнения автогенератора в «смешанном» режиме работы

4. Количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов. Для количественной оценки точности численных методов существуют различные способы: анализ локальной, глобальной и текущей погрешностей; определение погрешности в особых точках решения; определение погрешности расчета основных параметров физического процесса [17–20].

В данной работе удобно использовать последний способ, поскольку аналитическое решение уравнения (1) позволяет определить параметры генерируемых колебаний в установившемся режиме работы с точностью до последней значащей цифры, кроме того, данный способ имеет практическую направленность для задач разработки автоколебательных систем.

Рассмотрим относительную погрешность оценки амплитуды генерируемых колебаний:

$$\varepsilon_A = |A_{mk} - A_{m0}| / A_{m0}, \quad (6)$$

где A_{mk} – оценка амплитуды генерируемого колебания, полученная в результате численного анализа; A_{m0} – точное значение амплитуды.

На рис. 10 приведены относительные погрешности расчета амплитуды колебаний в универсальной модели автогенератора, полученные для методов трапеций (Tr) и Гира (Gear) в различных режимах работы и при различных значениях RELTOL.

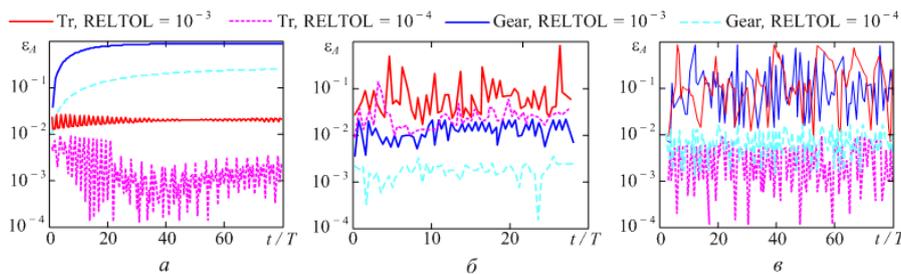


Рис. 10. Относительные погрешности расчета амплитуды колебаний для универсальной модели автогенератора методами Tr и Gear в режиме гармонических колебаний (а), в режиме релаксационных колебаний (б) и в «смешанном» режиме (в)

Из рис. 10 видно, что максимальная относительная погрешность расчета амплитуды колебаний $\varepsilon_{A \max}$ существенно зависит от выбора численного метода и режима работы автогенератора:

- ♦ в режиме гармонических колебаний $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций не превышает 3%, а для метода Гира может достигать 100 %;
- ♦ в режиме релаксационных колебаний $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций – до 100%, для метода Гира – не более 3%;
- ♦ в «смешанном» режиме работы $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций и для метода Гира может достигать 100%.

Заключение. В работе представлена универсальная схемная модель автоколебательной цепи, для которой получено установившееся аналитическое решение и определены его основные параметры с точностью до последнего знака разрядной сетки компьютера.

Представленная модель позволяет как качественно, так и количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах в различных режимах работы – в режиме гармонических колебаний, в

режиме релаксационных колебаний, а также в «смешанном» режиме, при котором отклик цепи содержит как экспоненциальные составляющие с различной скоростью изменения, так и квазигармонические составляющие.

Полученные результаты подтверждают высокую точность метода трапеций в режиме гармонических колебаний, а метода Гира – в режиме релаксационных колебаний. Относительные погрешности определения амплитуды колебаний с помощью данных методов для соответствующих им режимов работы не превышают 3%. В то же время, в «смешанном» режиме работы относительные погрешности определения амплитуды колебаний для обоих методов могут достигать 100%, что подтверждает необходимость применения дополнительных опций или разработки специальных методов численного анализа переходных процессов для SPICE-симуляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Проблемы разработки математического ядра для программ моделирования динамики технических систем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 31-38.
2. Bernardini A., Maffezzoni P., Sarti A. Linear Multistep Discretization Methods with Variable Step-Size in Nonlinear Wave Digital Structures for Virtual Analog Modeling // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2019. – Vol. 27, No. 11. – P. 1763-1776.
3. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Development and Testing of High Accuracy Hybrid Methods for Time-Domain Simulation of Electronic Circuits and Systems // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110124>.
4. Maffezzoni P., Codecasa L., D'Amore D. Time-domain simulation of nonlinear circuits through implicit Runge–Kutta methods // IEEE Transactions on Circuits Systems – I: Regular Papers. – 2007. – Vol. 54, No. 2. – P. 391-400.
5. Hairer E. Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems – 2nd rev. ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. – 614 p.
6. Ascher U.M. Computer Methods for Ordinary Equations and Differential-Algebraic Equations – Philadelphia, PA: SIAM, 1998. – 332 p.
7. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2008. – 463 p.
8. Гужев Д.С., Калиткин Н.Н. Уравнение Бюргерса – тест для численных методов // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7, № 4. – С. 99-127.
9. Пилипенко А.М., Бирюков В.Н. Исследование эффективности современных численных методов при анализе автоколебательных цепей // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/9/text.html>.
10. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для студ. вузов. – 5-е изд., испр. – Москва: Дрофа, 2006. – 717 с.
11. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
12. NI Circuit Design Suite. Getting Started with NI Circuit Design Suite. – National Instruments Corporation, August 2010. – 198 p.
13. Бирюков В.Н. Руководство к лабораторным работам по курсу «Основы автоматизированного анализа цепей». – Вып. 3 – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 27 с.
14. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2002. – 292 с.
15. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems. – 2nd rev. ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. – 528 p.
16. Pilipenko A.M., Biryukov V.N., Fadeeva A.B. Methods of Testing Time-Domain Simulators in EDA Packages // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2016. – P. 172-175.
17. Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / ed. by G. Hall, J.M. Watt – Clarendon Press, Oxford, 1976. – 336 p.

18. Maffezzoni P.A. Versatile Time-Domain Approach to Simulate Oscillators in RF Circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers. – 2009. – Vol. 56, No. 3. – P. 594-603.
19. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М. Анализ погрешности численного моделирования автогенераторов во временной области // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 11 (160). – С. 119-127.
20. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. An Approach to Estimate the Error of Oscillator Time-Domain Analysis // Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2013. – P. 223-226.

REFERENCES

1. Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B. Problemy razrabotki matematicheskogo yadra dlya programm modelirovaniya dinamiki tekhnicheskikh sistem [Problems of developing a mathematical core for modeling the dynamics of technical systems], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development], 2020, No 4, pp. 31-38.
2. Bernardini A., Maffezzoni P., Sarti A. Linear Multistep Discretization Methods with Variable Step-Size in Nonlinear Wave Digital Structures for Virtual Analog Modeling, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, Vol. 27, No. 11, pp. 1763-1776.
3. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Development and Testing of High Accuracy Hybrid Methods for Time-Domain Simulation of Electronic Circuits and Systems, *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110124>.
4. Maffezzoni P., Codecasa L., D'Amore D. Time-domain simulation of nonlinear circuits through implicit Runge–Kutta methods, *IEEE Transactions on Circuits Systems – I: Regular Papers*, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 391-400.
5. Hairer E. Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems. 2nd rev. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 614 p.
6. Ascher U.M. Computer Methods for Ordinary Equations and Differential-Algebraic Equations, Philadelphia, PA: SIAM, 1998, 332 p.
7. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. 2nd ed., John Wiley & Sons, 2008, 463 p.
8. Guzhev D.S., Kalitkin N.N. Uravnenie Biurgersa – test dlia chislennykh metodov [Burgers equation is a test for numerical methods], *Matematicheskoe modelirovanie* [Russian Journal of Mathematical Modeling], 1995, Vol. 7, No. 4, pp. 99-127.
9. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Investigation of modern numerical analysis methods of self-oscillatory circuits efficiency, *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2013, No. 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/9/text-engl.html>.
10. Gonorovskiy I.S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie dlya stud. vuzov [Radio engineering circuits and signals: textbook manual for university students], 5th ed., rev., Moscow: Drofa, 2006, 717 p.
11. Manaev E.I. Osnovy radioelektroniki [Fundamentals of radio electronics], Moscow: Radio i sviaz, 1990, 512 p.
12. NI Circuit Design Suite. Getting Started with NI Circuit Design Suite, National Instruments Corporation, August 2010, 198 p.
13. Biriukov V.N. Rukovodstvo k laboratornym rabotam po kursu «Osnovy avtomatizirovannogo analiza tsepei» [Guide to laboratory works on the course «Fundamentals of computer-aided circuit analysis»], Issue 3, Taganrog: Izd-vo TRTU, 2001, 27 p.
14. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. Nelineinye kolebaniya: ucheb. posobie dlya vuzov [Nonlinear vibrations: textbook manual for universities], Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2002, 292 p.
15. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems, 2nd rev. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, 528 p.
16. Pilipenko A.M. Biryukov V.N., Fadeeva A.B. Methods of Testing Time-Domain Simulators in EDA Packages, *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2016, pp. 172-175.
17. Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations, ed. by G. Hall, J.M. Watt, Clarendon Press, Oxford, 1976, 336 p.

18. Maffezzoni P.A. Versatile Time-Domain Approach to Simulate Oscillators in RF Circuits, *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2009, Vol. 56, No. 3, pp. 594-603.
19. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. Analiz pogreshnosti chislennogo modelirovaniya avtogeneratorov vo vremennoy oblasti [Analysis of the error of oscillator's numerical simulation in the time domain], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 11 (160), pp. 119-127.
20. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. An Approach to Estimate the Error of Oscillator Time-Domain Analysis, *Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2013, pp. 223-226.

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

Пилипенко Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; зав. кафедрой; к.т.н.

Агабекян Артём Вячеславович – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; студент.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; head of the department.

Agabekyan Artyom Vyacheslavovich – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; the department of fundamentals of radio engineering; student.

УДК 303.717

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-254-262

А. Аль-Шамки, В.В. Шадрина, В.Г. Галалу

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Одной из самых распространенных технологических операций является сварка отдельных деталей и блоков. Сварка находит широкое применение в судостроении, авиационной, оборонной и химической промышленности, при строительстве нефте- и газопроводов. При этом к качеству сварного шва предъявляются весьма жесткие требования по прочности, отсутствию пустот и каверн, работоспособности при высоких давлениях (до 100 кг/см²) и в широком диапазоне температур ($\pm 50^\circ\text{C}$). Наиболее полно этим требованиям соответствует плазменная (аргоновая) сварка. Выполнен краткий аналитический обзор по теме исследования. Показано, что перспективным направлением развития систем управления плазменной сваркой является применение гибридных регуляторов, созданных на основе классических методов автоматического управления и нечетком регулировании, формализующем усредненные знания экспертов. Нечеткий компонент (знание экспертов) должен быть доступен для быстрого и простого ввода в регулятор. Была разработана структурная схема и модель одного канала гибридного регулятора в среде Matlab Simulink. Моделировался канал управления силой тока с использованием нечеткого регулятора из библиотеки Fuzzy Logic, с применением алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Задавалось 19 вариантов лингвистических и нечетких переменных, была получена поверхность функции принадлежности переменных. Следует отметить возможность быстрого ввода лингвистических оценок экспертов в память гибридного регулятора. Анализировалось поведение моделей гибридного регулятора и стандартных ПИ и ПИД-регуляторов при единичном ступенчатом воздействии. Гибридный регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели качества (в 2,5-3 раза), чем стандартные регуляторы. Гибридный регулятор выходит на установившийся режим через 6с, ПИД-регулятор – через 13с, ПИ-регулятор – через 15с, причем стандартные регуляторы имеют

перерегулирование (первый выброс) до 50%. Таким образом показана реальная возможность построения нечёткого гибридного регулятора с заданными характеристиками. Возможна реализация гибридного регулятора в виде ПЛИС.

Плазменная сварка; эксперимент; параметры; моделирование; гибридный регулятор; знания экспертов.

A. Al-Shamki, V.V. Shadrina, V.G. Galalu

SIMULATION OF A HYBRID CONTROLLER FOR CONTROLLING PLASMA WELDING PARAMETERS

One of the most common technological operations is welding of individual parts and blocks. Welding is widely used in shipbuilding, aviation, defense and chemical industries, in the construction of oil and gas pipelines. At the same time, very strict requirements are imposed on the quality of the weld in terms of strength, absence of voids and cavities, operability at high pressures (up to 100 kGf/cm²) and in a wide temperature range ($\pm 50^\circ\text{C}$). Plasma (argon) welding meets these requirements most fully. A brief analytical review on the research topic was carried out. It is shown that a promising direction for the development of plasma welding control systems is the use of hybrid regulators created on the basis of classical automatic control methods and fuzzy control, formalizing the average knowledge of experts. The fuzzy component (expert knowledge) should be available for quick and easy input into the controller. A block diagram and a model of a single channel of a hybrid controller was developed in the Matlab Simulink environment. The current control channel was modeled using a fuzzy controller from the Fuzzy Logic library, using the Mamdani fuzzy output algorithm. 19 variants of linguistic and fuzzy variables were set, the surface of the variable membership function was obtained. It should be noted that it is possible to quickly enter linguistic assessments of experts into the memory of the hybrid controller. The behavior of hybrid controller models and standard PI and PID controllers under a single step action was analyzed. The hybrid regulator provides significantly better quality indicators (2.5-3 times) than standard regulators. The hybrid controller enters the steady-state mode after 6s, the PID controller – after 13s, the PI controller - after 15s, and the standard regulators have an overshoot (first emission) of up to 50%. Thus, the real possibility of constructing a fuzzy hybrid controller with specified characteristics is shown. It is possible to implement a hybrid controller in the form of an FPGA.

Plasma welding; experiment; parameters; simulation; hybrid regulator; expert knowledge.

Введение. Электрическая сварка находит широкое применение во многих отраслях народного хозяйства Российской Федерации, в частности в судостроении, при производстве железнодорожных вагонов и цистерн, в строительстве, в авиационной и ракетной технике [1, 2]. При этом к качеству сварных изделий предъявляются очень жёсткие требования по прочности сварных конструкций, герметичности, возможности работы в широком диапазоне температур и т.д. Например, при строительстве газопровода «Северный поток -2» было уложено более 100 000 труб длиной 12м и толщиной стенок 21мм, каждый стык проходил тщательный ультразвуковой и рентгеновский контроль, внутренняя поверхность сварного шва полировалась, так как транспортировка газа происходит при давлении до 100 атмосфер и скорости газового потока до 300 км/час [3]. Ещё более жесткие требования предъявляются к военной и космической технике, при сварке прочного корпуса подводных лодок и т.д. Объем сварочных работ в РФ достаточно большой и непрерывно увеличивается, в первую очередь для нужд нефтегазовой сферы и оборонной промышленности, где предъявляются весьма жесткие требования к качеству сварных швов и прочности сварных соединений. Основным критерием сварки можно назвать качество сварного шва [2, 3], но понятие «качество сварного шва» является вербальным и его рассматривают, как совокупность локальных критериев: время сварки, скорость оплавления и осадки, коэффициент наплавки при сварке, потери электродного металла при сварке на угар и разбрызгивание, коэффициент расхода электродов и многие другие критерии, актуальность и выбор которых зависят от вида сварки и свариваемых материалов [2, 4].

С статье рассматриваются результаты исследования процессов (технологий) и управления плазменной сваркой, как самым перспективным направлением сварочного производства [5–7].

Анализ технологии плазменной сварки. При плазменной сварке нагрев деталей выполняется направленным потоком дуговой плазмы (плазменной струей), вызывающей плавление свариваемых материалов.

Хотя метод плазменной дуговой сварки металла в защитных газах был разработан ещё в 70-80-х годах 20-го века исследования в данной области остаются актуальными и сейчас, так как многие проблемы процесса сварки далеки от оптимальных решений. Результаты исследований могут быть использованы и для других видов сварки, т.к. независимо от видов сварки и свариваемых материалов, на данный процесс следует смотреть, как на систему, и применять для его анализа методы теории систем [6–8] и системного анализа [9–11].

При выборе типа сварочного процесса в первую очередь уделяется внимание таким параметрам, как качество сварного шва, механическая прочность, герметичность, коррозионная устойчивость и прочие характеристики. Наиболее эффективной по всем качественным показателям сварного шва является плазменная сварка, которая относится к термическому классу сварки и является одним из видов дуговой сварки, что следует учитывать при выборе модели физико-химических процессов плазменной сварки [1, 2].

Для реализации плазменной сварки используются плазменные горелки, которые иногда называют плазмотронами. Плазменная струя формируется из потока сильно ионизированного инертного газа, например аргона, который используют для быстрого охлаждения основного дугового разряда. То есть, плазма представляет собой поток положительно и отрицательно заряженных ионов инертного газа, которые возникают под действием мощных электрических и магнитных полей дугового разряда. При этом температура плазменной струи может достигать 30 000К, что позволяет выполнять сварку самых тугоплавких металлов. Высокая температура быстро плавит кромки свариваемых деталей и формирует прочное соединение [3, 4].

Поскольку существующие методы математического описания процесса сварки являются сложными для их использования в регуляторах при быстром протекании процесса сварки, не гарантируют требуемые качественные характеристики сварного шва, предлагается использовать методы нечеткой логики, в том числе методы гибридного управления.

Модель гибридного регулятора. На первом этапе осуществлялось решение задачи управления одним параметром сварки посредством гибридного регулятора. Задача исследования состоит в создании модели гибридного регулятора в среде Matlab Simulink. Целью выполнения моделирования, является оценка и сравнение эффективности применения классического пропорционально-интегрально регулятора (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД) и гибридного регулятора [12, 14].

В системе автоматического управления объектом управления является плазмотрон. Математическую модель плазмотрона определим в виде передаточной функции:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(1+T_1p)(1+T_2p)}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи; τ – время запаздывания, представляющее собой время распространения тепловой энергии от дуги к металлу; T_1 и T_2 – постоянные времени.

Входным воздействием исполнительного элемента системы автоматического управления сваркой - плазмотрона, является сила тока. Выходная характеристика - глубина проплавления свариваемого листа. На вход плазмотрона подается управляющее воздействие от регулятора (в аппаратной реализации – от усилителя-преобразователя.). Регулятор связан с выходом плазмотрона обратной отрицательной связью.

Задача управления и моделирования состоит в минимизации ошибки отклонения от заданной глубины проплавления материала при выполнении сварки. Рассмотрим применение нечеткого регулятора. В библиотеке Fuzzy Logic размещен нечеткий регулятор. В работе нечеткого регулятора применен алгоритм нечеткого вывода Мамдани [13–15].

Рассмотрим задание лингвистических и нечетких переменных, а также функций принадлежности нечетких переменных на основе знаний экспертов. Определим лингвистические переменные: e «величина ошибка» и int - интеграл ошибки, и формально в пакете Matlab определим систему для моделирования, как показано на рис. 1.

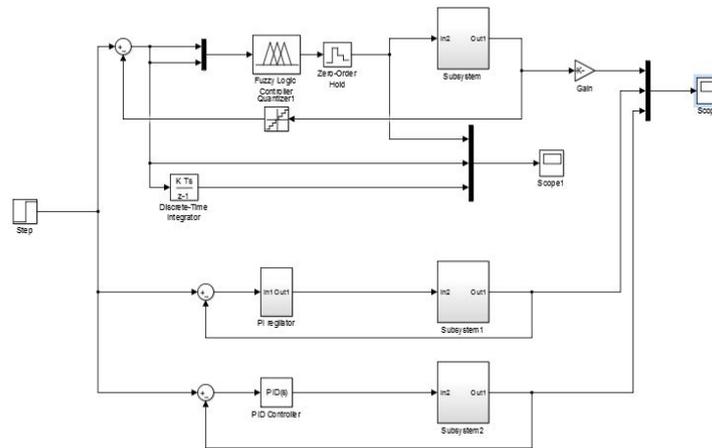


Рис. 1. Структурная схема моделирования поведения гибридного регулятора

При описании терм множеств были использованы общепринятые обозначения:

- ◆ ZN (Zero Negative) – отрицательное, близкое к нулю;
- ◆ Z(Zero) – Нуль, близкий к нулю;
- ◆ ZP (Zero Positive) – Положительное, близкое к нулю;
- ◆ PS (Positive Small) – Положительное малое;
- ◆ PM (Positive Medium) – Положительное среднее;
- ◆ PB(Positive Big) – Положительное большое [15,16, 18].

Для построения модели были определены и описаны лингвистические переменные, характеризующие процесс:

- ◆ e терм-множество $T(e) = \{ZN - \text{минимальная ошибка слева; } Z - \text{несущественная ошибка; } ZP - \text{(средняя) несущественная ошибка справа; } PS - \text{(большая) небольшая ошибка справа; } PM - \text{(очень большая) значительная ошибка справа}\}$;

- ◆ int терм-множество $T(int) = \{Z - \text{(близкое к нулю) несущественное значение интеграла ошибки}\}$; $ZP - \text{несущественный интеграл ошибки справа; } PS - \text{минимальный интеграл ошибки справа; } PM - \text{существенный интеграл ошибки справа}\}$, $PB - \text{очень большое значение интеграла ошибки справа}\}$.

На основании анализа экспертной информации было задано множество правил нечеткого логического вывода:

◆ R_1 : если ошибка есть Z – несущественная ошибка и интеграл ошибки Z – несущественное значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть Z – несущественное напряжение;

◆ R_2 : если ошибка есть ZP – (средняя) несущественная ошибка и интеграл ошибки есть Z – несущественное значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть ZP – (среднее) несущественное напряжение;

◆

◆ R_{18} : если ошибка есть ZP – (средняя) несущественная ошибка и интеграл ошибки есть PB – очень большое значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть PB – колоссальное напряжение.

◆ R_{19} : если ошибка есть PS – (большая) небольшая ошибка и интеграл ошибки есть PB – очень большое значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть PMB – (большое) колоссальное напряжение.

На рис. 2 показан результат задания экспертных правил в Matlab.

```

1. If (e is Z) and (int is Z) then (u is Z) (0.83)
2. If (e is ZP) and (int is Z) then (u is ZP) (0.83)
3. If (e is PS) and (int is Z) then (u is PS) (0.83)
4. If (e is PM) and (int is Z) then (u is PM) (0.83)
5. If (e is Z) and (int is ZP) then (u is ZP) (0.83)
6. If (e is ZP) and (int is ZP) then (u is PS) (0.83)
7. If (e is PS) and (int is ZP) then (u is PS) (0.83)
8. If (e is PM) and (int is ZP) then (u is PM) (0.83)
9. If (e is Z) and (int is PS) then (u is PS) (0.83)
10. If (e is ZP) and (int is PS) then (u is PS) (0.83)
11. If (e is PS) and (int is PS) then (u is PM) (0.83)
12. If (e is PM) and (int is PS) then (u is PMM) (0.83)
13. If (e is Z) and (int is PM) then (u is PM) (0.83)
14. If (e is ZP) and (int is PM) then (u is PMM) (0.83)
15. If (e is PS) and (int is PM) then (u is PB) (0.83)
16. If (e is PM) and (int is PM) then (u is PB) (0.83)
17. If (e is Z) and (int is PB) then (u is PB) (0.83)
18. If (e is ZP) and (int is PB) then (u is PB) (0.83)
19. If (e is PS) and (int is PB) then (u is PMB) (0.83)

```

Рис. 2. Задание экспертами правил нечеткого логического вывода

В результате была получена поверхность вывода функции принадлежности, представленная на рис. 3, где желтый цвет соответствует максимальному напряжению, синий – минимальному.

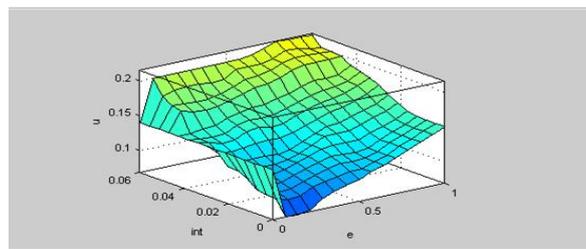


Рис. 3. Окно просмотра поверхности вывода функции принадлежности

Рис. 4 Структурная подпись моделирования гибридного регулятора

В состав моделируемого гибридного регулятора входят сумматор, нечёткий контроллер Fuzzy Logic, цифро-аналоговый преобразователь, модель объекта управления [24, 25]. В цепь отрицательной обратной связи включён аналого-цифровой преобразователь. Для контроля выходного состояния объекта управления (плазмотрона) используется осциллограф.

Для оценки эффективности работы гибридного регулятора, было осуществлено моделирование системы на основе ПИ- и ПИД- регуляторов. На рис. 5 представлены осциллограммы выходных напряжений для всех трёх рассмотренных регуляторов.

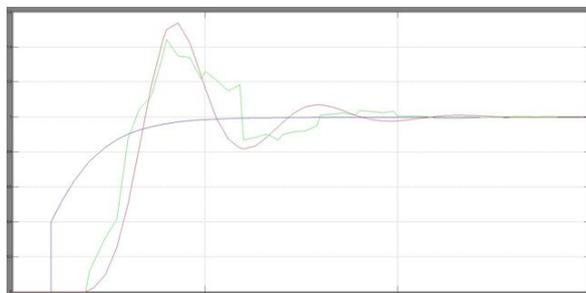


Рис. 5. Переходные характеристики нечеткого контроллера, ПИ-регулятора ПИД-регулятора

На рис. 5 жёлтым цветом представлен выход гибридного регулятора, очевидно, что он обеспечивает окончание переходного процесса через 6с без каких-либо выбросов и осцилляций. Сиреневым цветом представлен выход ПИ-регулятора, переходной процесс затухает только на 15-ой секунде, максимальный выброс составляет 35%. Голубым цветом представлен выход ПИД-регулятора, переходной процесс затухает только на 13-ой секунде, первый выброс напряжения составляет 50%. Следует отметить, что все попытки улучшить переходные процессы для классических ПИ- и ПИД-регуляторов, путём изменения коэффициентов усиления, постоянных интегрирования и дифференцирования не привели к существенному улучшению результатов. Например, при первом выбросе менее 5% для ПИ-регулятора переходной процесс заканчивался на 30с.

Вывод. Представленные в статье результаты проведенного моделирование нечёткого гибридного регулятора для управления параметрами плазменной сварки позволяют сделать вывод, что нечеткий регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели качества, чем ПИ-регулятор и ПИД-регулятор. Отсутствие перерегулирования позволяет нечеткому регулятору выйти на установившийся режим уже через 6 секунд, ПИ-регулятору требуется 15с, а ПИД-регулятору 13 с. Таким образом показана реальная возможность построения нечёткого гибридного регулятора с заданными характеристиками.

При изменении входных лингвистических переменных наблюдалось изменение степени принадлежности к различным термам выходной лингвистической переменной, но во всех случаях гибридный регулятор превосходил в 2,5–3 раза классические регуляторы по точности и быстродействию. Возможна реализация гибридного регулятора в виде ПЛИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов Г.Г. Шагин Д.М. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 464 с.
2. Еремин Е.Н. Плазменно-дуговые технологические процессы в сварочном производстве. учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. – 275 с.
3. Wu C.S. Welding thermal processes and weld pool behaviors. – Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2011. – 321 p.
4. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling // Evolution and Materials Processing, and Institute of Materials Joining. Shandong University, Jinan 250061, China, Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16. – P. 74-85.

5. *Финаев В.И., Глод О.Д.* Основы теории систем. учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 156 с.
6. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. – Л.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.
7. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ: учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1989. – 367 с.
8. *Funabashi M.* Fuzzy and neural hybrid expert systems: Synergetic AI // IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications. – 1995. – Vol. 10, Issue 4. – P. 32-40.
9. *Гаврилов А.В., Новицкая Ю.В.* Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: НГТУ, 2006.
10. *Goonatilake S., Khebbal S.* Intelligent Hybrid Systems. – Publisher: Wiley, 1995. – ISBN 0471942421.
11. *Финаев В.И.* Модели принятия решений. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 101 с.
12. *Zadeh L.A.* Fuzzy logic and approximate reasoning // Synthese. – 1975. – Vol. 80. – P. 407-428.
13. *Берштейн Л.С., Боженик А.В.* Нечеткие модели принятия решений: дедукция, аналогия: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 110 с.
14. *Гайдук А.Р.* Непрерывные и дискретные системы управления. – 2-е изд. перераб. – М.: Учебно-методический и издательский центр «Учебная литература», 2004. – 252 с.
15. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
16. *Witsenhausen H.S.* A Class of Hybrid-State Continuous Time Dynamic Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1966. – Vol. 11, No. 2.
17. *Игнатьев В.В.* Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 89-94.
18. *Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang.* Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling // Journal of Manufacturing Processes. – August 2016. – Vol. 23. – P. 315-327.
19. *Benjamin Das, N. Yadaiah, Rupshree Ozah, Sohini Chowdhury, Arpan Kumar Mondal, M. Muralidhar.* A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process // Material today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, Issue 2, Part 1. – P. 6345-6350.
20. *Аль-Шамки Амир Абдулкадим Оуда.* Программное обеспечение для исследования линейных моделей управления на примере управления плазменной сваркой // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2019: Матер. конференции. Т. 1. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 131-136.
21. *Al-Shamkhee Ameer Abdulkadhim Oudah, Shepelev Anatoliy Fedorovich, Finaev Valeriy Ivanovich & Zargaryan Elena Valerevna.* Research on the possibilities of using linear observation models in welding processes // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – September 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 1163-1176. – ISSN 2303-4521.
22. *Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Ignatyeva A., Vorotova A.* System for Automatic Adjustment of Intelligent Controller Parameters // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1084. – P. 226-2423. – DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3_18.
23. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Issue 10. – Vol. 23. – P. 1291-1297. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
24. *Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Andrey K., Ignatyeva A.* The Fuzzy Rule Base Automatic Optimization Method of Intelligent Controllers for Technical Objects Using Fuzzy Clustering // Communications in Computer and Information Science: Conference on Creativity in Intelligent Technologies and Data Science, CIT and DS 2019; Volgograd; Russian Federation; 2019–2019. – Vol. 1084. – P. 135-1523. The Code 230149. – DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3_11.
25. *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.
26. *Шестова Е.А., Шадрин В.В.* Исследование построения видов операций над нечеткими множествами и нечеткой аппроксимирующей системы в среде MATLAB: учеб. пособие. – Таганрог, 2019.

REFERENCES

1. Chernyshov G.G. SHashin D.M. Oborudovanie i osnovy tekhnologii svarki metallov plavleniem i davleniem: ucheb. posobie [Equipment and fundamentals of metal welding technology by melting and pressure: textbook]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2013, 464 p.
2. Eremin E.N. Plazmenno-dugovye tekhnologicheskie protsessy v svarochnom proizvodstve. ucheb. posobie [Plasma-arc technological processes in welding production: textbook]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2000, 275 p.
3. Wu C.S. Welding thermal processes and weld pool behaviors. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2011, 321 p.
4. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling, *Evolution and Materials Processing, and Institute of Materials Joining. Shandong University, Jinan 250061, China, Journal of Manufacturing Processes*, 2014, Vol. 16, pp. 74-85.
5. Finaev V.I., Glod O.D. Osnovy teorii sistem. ucheb. posobie [Fundamentals of systems theory: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 156 p.
6. Volkova V.N., Denisov A.A. Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and system analysis]. Leningrad: Izd-vo SPbGTU, 1997, 510 p.
7. Peregodov F.I., Tarasenko F.P. Vvedenie v sistemnyy analiz: ucheb. posobie [Introduction to System Analysis: textbook]. Moscow: Vyssh. shkola, 1989, 367 p.
8. Funabashi M. Fuzzy and neural hybrid expert systems: Synergetic AI, *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, 1995, Vol. 10, Issue 4, pp. 32-40.
9. Gavrilov A.V., Novitskaya Yu.V. Gibridnye intellektual'nye sistemy [Hybrid intelligent systems]. Novosibirsk: NGTU, 2006.
10. Goonatilake S., Khebbal S. Intelligent Hybrid Systems. Publisher: Wiley, 1995. ISBN 0471942421.
11. Finaev V.I. Modeli prinyatiya resheniy [Decision making models]. Taganrog: TRTU, 2005, 101 p.
12. Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning, *Synthese*, 1975, Vol. 80, pp. 407-428.
13. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Nechetkie modeli prinyatiya resheniy: deduktsiya, analogiya: monografiya [Fuzzy decision-making models: deduction, analogy: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2001, 110 p.
14. Gayduk A.R. Nепreryvnye i diskretnye sistemy upravleniya [Continuous and discrete control systems]. 2nd ed. Moscow: Uchebno-metodicheskiy i izdatel'skiy tsentr «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
15. Kolesnikov A.V. Gibridnye intellektual'nye sistemy: teoriya i tekhnologiya razrabotki [Hybrid intelligent systems: theory and development technology]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
16. Witsenhausen H.S. A Class of Hybrid-State Continuous Time Dynamic Systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1966, Vol. 11, No. 2.
17. Ignat'ev V.V. Adaptivnye gibridnye intellektual'nye sistemy upravleniya [Adaptive hybrid intelligent control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 89-94.
18. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling, *Journal of Manufacturing Processes*, August 2016, Vol. 23, pp. 315-327.
19. Benjamin Das, N. Yadaiah, Rupshree Ozah, Sohini Chowdhury, Arpan Kumar Mondal, M. Muralidhar. A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process, *Material today: Proceedings*, 2018, Vol. 5, Issue 2, Part 1, pp. 6345-6350.
20. Al'-Shamki Amir Abdulkadim Ouda. Programmnoe obespechenie dlya issledovaniya lineynykh modeley upravleniya na primere upravleniya plazmennoy svarkoy [Software for the study of linear control models on the example of plasma welding control], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2019: Mater. konferentsii* [Technologies for the development of information systems TRIS-2019: Conference materials]. Vol. 1. Taganrog: Izd-tvo YuFU, 2019, pp. 131-136.
21. Al-Shamkhee Ameer Abdulkadhim Oudah, Shepelev Anatoliy Fedorovich, Finaev Valeriy Ivanovich & Zargaryan Elena Valerevna. Research on the possibilities of using linear observation models in welding processes, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, September 2019, Vol. 7, No. 3, pp. 1163-1176. ISSN 2303-4521.

22. Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Ignatyeva A., Vorotova A. System for Automatic Adjustment of Intelligent Controller Parameters, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, Vol. 1084, pp. 226-2423. DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3_18.
23. Ignatyev V.V., Finaev V.I. The use of hybrid regulator in design of control systems, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Issue 10, Vol. 23, pp. 1291-1297. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
24. Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Andrey K., Ignatyeva A. The Fuzzy Rule Base Automatic Optimization Method of Intelligent Controllers for Technical Objects Using Fuzzy Clustering, *Communications in Computer and Information Science: Conference on Creativity in Intelligent Technologies and Data Science, CIT and DS 2019; Volgograd; Russian Federation; 2019–2019*, Vol. 1084, pp. 135-1523. The Code 230149. DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3_11.
25. 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.
26. Shestova E.A., Shadrina V.V. Issledovanie postroeniya vidov operatsiy nad nechetkimi mnozhestvami i nechetkoy approksimiruyushchey sistemy v srede MATLAB: ucheb. posobie [Study of building types of operations on fuzzy sets and a fuzzy approximating system in the MATLAB environment: textbook]. Taganrog, 2019.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Н.А.Иванова.

Аль-Шамки Амир Абдулкадим Оуда – Южный федеральный университет; e-mail: al-shamki@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; соискатель на степень кандидата наук.

Шадрина Валентина Вячеславовна – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Галалу Валентин Гаврилович – e-mail: v.galalu@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Al-Shamki Amir Abdulkadim Ouda –Southern Federal University; e-mail: al-shamki@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; cand. for the degree of cand. sc.

Shadrina Valentina Vyacheslavovna – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; the department of automatic control systems; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.

Galalu Valentin Gavrilovich – e-mail: v.galalu@mail.ru; the department of automatic control systems; candidate of technical sciences; associate professor.

Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-263-270

А.В. Андрианов, Д.Е. Губарев, А.Н. Зикий, П.Н. Зламан

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

Защитное устройство (ограничитель) на входе приемника является важной составной частью, так как обеспечивает безопасность эксплуатации приемника в условиях приема мощных сигналов. Представлены результаты экспериментального исследования защитного устройства диапазона 1–4 ГГц. Показано, что минимальные потери в полосе пропускания при низком уровне мощности не превышают 0,63 дБ, максимальные потери в полосе пропускания составляют 1,23 дБ. При входной мощности 25 дБм защитное устройство работает в нелинейном режиме, поэтому создает гармоники входной частоты. Представлены экспериментальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) защитного устройства, а также амплитудные характеристики на трех частотах. Эксперимент по снятию АЧХ проводился на векторном анализаторе цепей. Эксперимент по снятию амплитудных характеристик проводился с помощью генератора стандартных сигналов и анализатора спектра на трех частотах: 1 ГГц; 2 ГГц; 4 ГГц. Конструктивно защитное устройство представляет собой подложку из поликора, на которой размещены все элементы, кроме соединителей. Подложка помещена в корпус рамочного типа и закрыта двумя герметичными крышками. В качестве соединителей применены гнезда тип III по ГОСТ13317-89. Дана принципиальная схема и краткое описание конструкции. Достигнуты следующие основные параметры: потери не превышают 1,23 дБ в диапазоне рабочих частот от 1 до 4 ГГц, мощность выходного сигнала при высоком уровне входной мощности ($f=1$ ГГц; $P_{вх}=25$ дБм) не превышает 12 дБм. Защитное устройство рекомендуется использовать во входных цепях приемников связи, навигации, радиолокации и радиоэлектронной борьбы.

Защитное устройство; ограничитель; амплитудная характеристика; амплитудно-частотная характеристика; спектр выходного сигнала; приемники.

A.V. Andrianov, D.E. Gubarev, A.N. Zikiy, P.N. Zlaman

EXPERIMENTAL STUDY OF A PROTECTIVE DEVICE

The protective device (limiter) at the receiver input is an important component, as it ensures the safety of the receiver operation in conditions of receiving powerful signals. The results of an experimental study of a protective device in the 1-4 GHz band are presented. It is shown that the minimum bandwidth losses at a low power level do not exceed 0.63 dB, the maximum bandwidth losses are 1.23 dB. At an input power of 25 dBm, the protective device operates in a non-linear mode, therefore it creates harmonics of the input frequency. The experimental amplitude-frequency response (AFC) of the protective device, as well as amplitude characteristics at three frequencies are presented. The experiment to remove the frequency response was carried out on a vector analyzer of circuits. The experiment to remove the amplitude characteristics was carried out using a standard signal generator and a spectrum analyzer at three frequencies: 1 GHz; 2 GHz; 4 GHz. Structurally, the protective device is a polycor substrate on which all elements except connectors are placed. The substrate is placed in a frame-type housing and closed with two sealed lids. Type III sockets according to GOST13317-89 are used as connectors. A schematic diagram and a brief description of the design are given. The following main parameters have been achieved: losses do not exceed 1.23 dB in the operating frequency range from 1 to 4 GHz, the

output signal power at a high input power level ($f = 1 \text{ GHz}$; $R_{vh} = 25 \text{ dBm}$) does not exceed 12 dBm . The protective device is recommended to be used in the input circuits of communication receivers, navigation, radar and electronic warfare.

Protective device; limiter; amplitude characteristic; amplitude-frequency characteristic; output signal spectrum; receivers.

Введение. Защитные устройства (ЗУ) СВЧ нашли широкое применение в радио-приемных устройствах. Их описанию и исследованию посвящена обширная литература, в том числе монографии [1–3], обзоры [4], статьи [5–13], диссертации [14–16], патенты [17, 18], учебные пособия [19,20], однако их теория и практика далеки от завершения. Повышаются требования к их быстродействию, максимально допустимой входной мощности, широкополосности, совершенствуется их схемотехника и элементная база. Традиционно в защитных устройствах применяют pin-диоды и диоды с барьером Шотки [5–13]. ЗУ на основе диодов с барьером Шотки имеют большее быстродействие и меньшую просачивающуюся мощность, однако уступают pin-диодным ЗУ в энергопрочности [9, 13]. Резкое увеличение допустимой входной мощности можно получить путем применения резонансных диодных решеток [2].

Объектом исследования в данной работе является полупроводниковое защитное устройство десятисантиметрового диапазона волн.

Целью работы является получение амплитудно-частотной и амплитудных характеристик защитного устройства.

К защитному устройству предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 1 до 4 ГГц;
- ◆ потери в диапазоне рабочих частот при низком уровне входной мощности не более 3,5 дБ;
- ◆ уровень просачивающейся мощности на выход для непрерывного сигнала не более 12 дБм;
- ◆ волновое сопротивление 50 Ом.

Схема и конструкция. Перечисленные выше требования можно реализовать в ЗУ, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Защитное устройство состоит из двух соединителей X1, X2 типа III по ГОСТ13317, между которыми установлена печатная плата с тремя pin-диодами и катушкой индуктивности. Pin-диоды при низком уровне мощности СВЧ сигнала имеют высокое сопротивление и не шунтируют линию передачи. При высоком уровне мощности СВЧ сигнала pin-диоды имеют низкое сопротивление (от долей Ом до единиц Ом), поэтому они шунтируют линию передачи. Большая часть энергии входного СВЧ сигнала отражается, значительно меньшая часть поглощается pin-диодами или проходит в нагрузку.

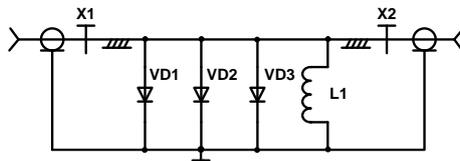


Рис. 1. Схема защитного устройства

Фото защитного устройства можно видеть на рис. 2. ЗУ имеет корпус с размерами 46x20x16 мм. Для работы в жестких условиях эксплуатации корпус герметизирован.

Моделирование. Моделирование защитного устройства проводилось в пакете прикладных программ Microwave Office (MWO). На рис. 3 изображена модель ЗУ из MWO. На рис. 4 показана амплитудно-частотная характеристика ЗУ из MWO. Получились очень низкие потери из-за идеализированной модели, не учитывающей потери в двух соединителях и другие факторы.



Рис. 2. Фото защитного устройства

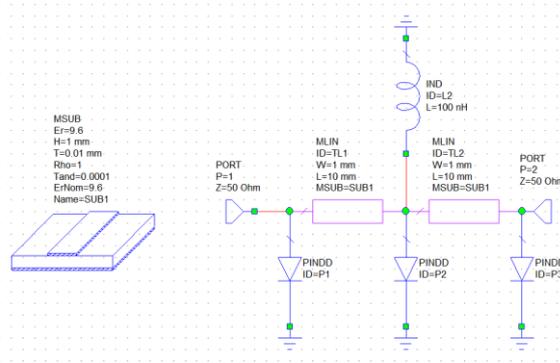


Рис. 3. Модель защитного устройства в MWO

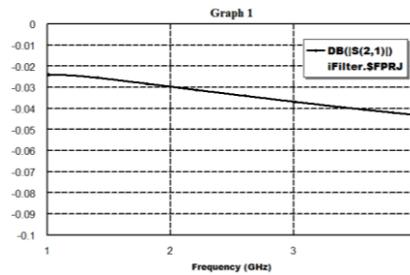


Рис. 4. АЧХ защитного устройства в MWO при низком уровне мощности

На рис. 5 представлена модель ЗУ для нелинейного анализа. С помощью этой модели получена амплитудная характеристика ЗУ, изображенная на рис. 6. Из этой характеристики видно, что ЗУ при мощностях более 15 дБм работает в режиме мягкого ограничителя.

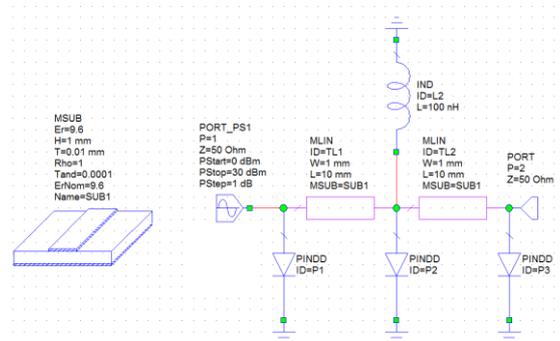


Рис. 5. Модель защитного устройства в MWO для нелинейного анализа

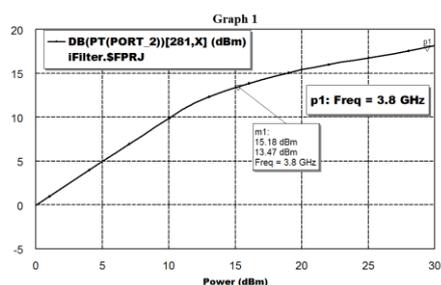


Рис. 6. Амплитудная характеристика защитного устройства, полученная в MWO

Эксперимент. Первый эксперимент проводился на установке, содержащей векторный анализатор цепей типа PNA-L, набор кабелей и переходов. Измерения проводились при низком уровне мощности. В качестве результата эксперимента на рис. 7 представлена амплитудно-частотная характеристика ЗУ в диапазоне частот 1-4 ГГц. Из этого рисунка можно видеть, что максимальные потери составляют 1,23 дБ, а неравномерность амплитудно-частотной характеристики составляет около 1 дБ.

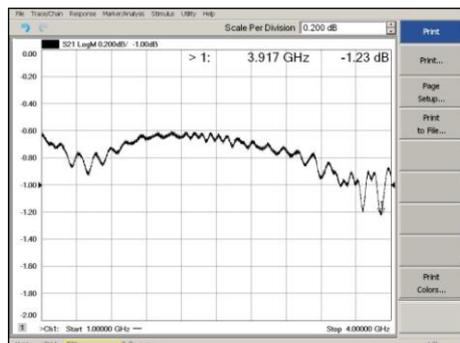


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика ЗУ

Второй эксперимент проводился на установке, содержащей генератор сигналов типа E8257D, анализатор спектра типа PXA N9030A, набор кабелей и переходов. Уровень входного сигнала ЗУ менялся от 0 до 25 дБм с шагом 2 дБ. Результаты измерения уровня выходного сигнала заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построены графики на рис. 8. Из этих графиков видно, что в режиме низкого уровня мощности ($P_{вх}=0$ дБм) потери ЗУ и двух кабелей составляют не более 2 дБ.

Таблица 1

Результаты испытаний ЗУ (амплитудные характеристики)

$P_{вх}$, дБм	1 ГГц $P_{вых}$, дБм	2 ГГц $P_{вых}$, дБм	4 ГГц $P_{вых}$, дБм
0	-1,38	-1,88	-3,31
2	0,62	0,05	-1,37
4	2,72	2,40	0,57
6	4,65	4,24	2,42
8	6,38	5,96	4,10
10	7,81	7,41	5,61
12	8,92	8,56	6,90
14	9,78	9,40	7,97
16	10,41	10,04	8,72

18	10,88	10,54	9,21
20	11,30	10,84	9,62
22	11,56	11,06	9,81
24	11,81	11,21	9,97
25	11,81	11,19	10,02

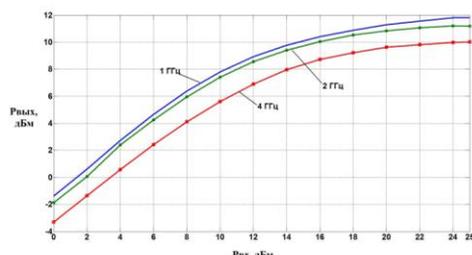


Рис. 8. Амплитудные характеристики ЗУ на трех частотах

Третий эксперимент проводился на той же измерительной установке, что и второй эксперимент. В нем проводилось фотографирование спектра выходного сигнала при частоте 1 ГГц и входной мощности +25 дБм. Из-за нелинейного режима работы ЗУ при большом уровне входного сигнала возникают гармоники полезного сигнала. На рис. 9 можно видеть первую, вторую и третью гармоники полезного сигнала на выходе ЗУ. При этом вторая гармоника слабее первой всего на 3,5 дБ, а третья слабее первой на 6,5 дБ.

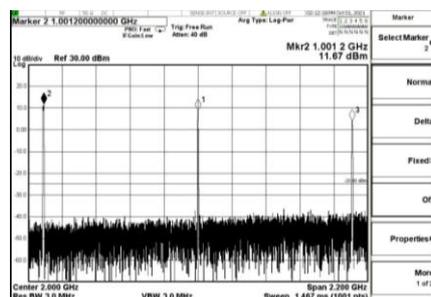


Рис. 9. Спектр сигнала на выходе ЗУ при входной частоте 1 ГГц и мощности +25 дБм

Заключение. Ниже сведены достигнутые параметры защитного устройства.

Основные достигнутые параметры ЗУ:

- ◆ Диапазон рабочих частот, 1-4 ГГц.
- ◆ Потери в диапазоне рабочих частот при низком уровне мощности, 3,31 дБ.
- ◆ Уровень просачивающейся мощности на выход для непрерывного сигнала при $P_{вх}=25$ дБм не более, 11,81 дБм.
- ◆ Волновое сопротивление при низком уровне мощности, 50 Ом.
- ◆ Подавление второй гармоники по отношению к первой гармонике при $f_{вх}=1$ ГГц; $P_{вх}=25$ дБм, 2,5 дБм.
- ◆ Подавление третьей гармоники по отношению к первой гармонике при $f_{вх}=1$ ГГц; $P_{вх}=25$ дБм, 6,5 дБм.

Из этой таблицы видно, что все требования к ЗУ выполняются. ЗУ рекомендуется использовать в приемниках СВЧ диапазона для повышения их помехозащищенности и электромагнитной совместимости. Особенно это актуально на подвижных носителях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ропий А.И., Старик А.М., Шутов К.К.* СВЧ защитные устройства. – М.: Радио и связь, 1993. – 128 с.
2. Электронные устройства СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. Кн. 2. – М.: Радиотехника, 2008. – 400 с.
3. *Клич С.М.* Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. – М.: Сов. радио, 1973. – 320 с.
4. *Виненко В.Г., Красовский С.В., Усанов Д.А.* СВЧ ограничители мощности на полупроводниковых приборах // Обзоры по электронной технике. Серия «Электроника СВЧ». – М.: ЦНИИ «Электроника», 1988.
5. *Виноградова А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н.* Полупроводниковое защитное устройство. Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники». – 2008. – № 1. – С. 112-116.
6. *Зикий А.Н., Бондаренко Л.В., Власенко Д.В., Монастырный А.С.* Защитное устройство миллиметрового диапазона // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники». – 2011. – № 2. – С. 106-109.
7. *Добуш И.М.* Обзор способов построения и схем СВЧ монолитных ограничителей мощности // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), Ч. 1. – С. 44-48.
8. *Крутов А.В., Ребров А.С.* Монолитная интегральная схема защитного устройства // Новые функциональные возможности: Матер. конференции «Крымико-2007». – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 79-80.
9. *Егорова Е.И., Козловский Э.Ю.* Низкобарьерные диоды Шоттки в технологии изготовления защитных устройств // Матер. конференции «Крымико-2008». – Севастополь, Вебер, 2008. – С. 116-117.
10. *Лебедев И.В.* Развитие переключаемых и защитных СВЧ- устройств // Радиотехника. – 1999. – № 4. – С. 69-73.
11. *Легенкин С.А.* Ограничитель КВЧ-диапазона // Электронная техника. Серия «СВЧ- техника». – 1992. – № 1. – С. 57-58.
12. *Лебедев И.В., Семенча М.В.* Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ мощности // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 17-21.
13. *Осипов А.М.* Защитное устройство на основе диодов Шоттки С- и Х-диапазонов // Матер. конференции «Крымико -2007». – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 97-98.
14. *Лазунин Ю.А.* Быстродействующие диодно-транзисторные ограничители мощности для приемных модулей СВЧ в гибридно-интегральном и монолитном исполнениях: автореф. дисс. ... к.т.н. – М.: МЭИ, 1993. – 20 с.
15. *Abdullah Yilmaz.* Design of high Power waveguide Limiter. The degree of Master of Science. – Middle East Technical University, 2014. – 83 p.
16. *Шнитников А.С.* Моделирование и разработка твердотельных ЗУ коротковолновой части СВЧ диапазона: дисс. ... д-ра тех. наук (05.27.01). – М.: МИЭТ, 1993. – 248 с.
17. Патент №1.827.041 (СССР). МКИ H01p 1/22. Ограничитель СВЧ мощности / Прохоров Р.А., Лебедев И.В., Скоробогатов Д.В. Открытия, изобретения. – 1993. – № 25.
18. Авторское свидетельство №1. 737.571 (СССР), МКИ H01p 1/15. Ограничитель СВЧ мощности / Лебедев И.В., Угничев Л.В., Скоробогатов Д.В. и др. Открытия, изобретения. – 1992. – № 20.
19. Проектирование радиоприемных устройств: учеб. пособие / под ред. А.П. Сиверса. – М.: Сов. радио, 1976. – 488 с.
20. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств: учеб. пособие / под ред. М.К. Белкина. – Киев: Вища школа, 1988. – 472 с.

REFERENCES

1. *Ropiy A.I., Starik A.M., Shutov K.K.* SVCh zashchitnye ustroystva [Microwave protective devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 128 p.
2. *Elektronnyye ustroystva SVCh* [Microwave electronic devices], ed. by I.V. Lebedeva. Book 2. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 400 p.
3. *Klich S.M.* Proektirovanie SVCh ustroystv radiolokatsionnykh priemnikov [Design of microwave devices for radar receivers]. Moscow: Sov. radio, 1973, 320 p.
4. *Vinenko V.G., Krasovskiy S.V., Usanov D.A.* SVCh ogranichiteli moshchnosti na poluprovodnikovyykh priborakh [Microwave power limiters on semiconductor devices], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya «Elektronika SVCh»* [Reviews on electronic engineering. Series "Microwave Electronics". Moscow: TSNI «Elektronika», 1988.

5. Vinogradova A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N. Poluprovodnikovoe zashchitnoe ustroystvo [Semiconductor protective device], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Questions of special radio electronics. Series "General issues of radio electronics"], 2008, No. 1, pp. 112-116.
6. Zikiy A.N., Bondarenko L.V., Vlasenko D.V., Monastyrnyy A.S. Zashchitnoe ustroystvo millimetrovogo diapazona [Millimeter wave protective device], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Questions of special radio electronics. Series "General issues of radio electronics"], 2011, No. 2, pp. 106-109.
7. Dobush I.M. Obzor sposobov postroeniya i skhem SVCh monolitnykh ogranichiteley moshchnosti [Review of construction methods and schemes of microwave monolithic power limiters], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], 2010, No. 2 (22), Part 1, pp. 44-48.
8. Krutov A.V., Rebrov A.S. Monolitnaya integral'naya skhema zashchitnogo ustroystva [Monolithic integrated circuit of the protective device. New functionality], *Novye funktsional'nye vozmozhnosti: Mater. konferentsii «Krymiko-2007»* [New functionality. Materials of the conference "Krymiko-2007"]. Sevastopol': Veber, 2007, pp. 79-80.
9. Egorova E.I., Kozlovskiy E.Yu. Nizkobar'ernye diody SHottki v tekhnologii izgotovleniya zashchitnykh ustroystv [Low-barrier Schottky diodes in the technology of manufacturing protective devices], *Mater. konferentsii «Krymiko-2008»* [Materials of the conference "Krymiko-2008"]. Sevastopol', Veber, 2008, pp. 116-117.
10. Lebedev I.V. Razvitie pereklyuchatel'nykh i zashchitnykh SVCh- ustroystv [Development of switching and protective microwave devices], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1999, No. 4, pp. 69-73.
11. Legenkin S.A. Ogranichitel' KVCh-diapazona [EHF range limiter], *Elektronnaya tekhnika. Seriya «SVCh- tekhnika»* [Electronic technology. Series "Microwave technology"], 1992, No. 1, pp. 57-58.
12. Lebedev I.V., Semencha M.V. Kvaziaktivnyy zashchitnyy ogranichitel' SVCh moshchnosti [Quasi-active protective microwave power limiter], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2001, No. 2, pp. 17-21.
13. Osipov A.M. Zashchitnoe ustroystvo na osnove diodov Shottki S- i Kh- diapazonov [Protective device based on Schottky diodes C- and X-ranges], *Mater. konferentsii «Krymiko -2007»* [Materials of the conference "Krymiko -2007"]. Sevastopol': Veber, 2007, pp. 97-98.
14. Lazunin Yu.A. Bystrodeystvuyushchie diodno-tranzistornye ogranichiteli moshchnosti dlya priemnykh moduley SVCh v gibridno-integral'nom i monolitnom ispolneniyakh: avtoref. diss. ... k.t.n. [High-speed diode-transistor power limiters for microwave receiving modules in hybrid-integrated and monolithic versions: abstract of the cand. of eng. sc, diss.]. Moscow: MEI, 1993, 20 p.
15. Abdullah Yilmaz. Design of high Power waveguide Limiter. The degree of Master of Science. Middle East Technical University, 2014, 83 p.
16. Shnitnikov A.S. Modelirovanie i razrabotka tverdotel'nykh ZU korotkovolnovoy chasti SVCh diapazona: disc. ... d-ra tekhn. nauk [Modeling and development of solid-state memory for the short-wave part of the microwave range: dr. of eng. sc. diss.] (05.27.01). Moscow: MIET, 1993, 248 p.
17. Prokhorov R.A., Lebedev I.V., Skorobogatov D.V. Patent №1.827.041 (SSSR). MKI N01r 1/22. Ogranichitel' SVCh moshchnosti [Patent No. 1.827.041 (USSR). MKI H01r 1/22. Microwave power limiter]. Discoveries, inventions. 1993, No. 25.
18. Lebedev I.V., Ugnichev L.V., Skorobogatov D.V. i dr. Avtorskoe svidetel'stvo №1. 737.571 (SSSR), MKI N01p 1/15. Ogranichitel' SVCh moshchnosti [Copyright certificate No. 1. 737.571 (USSR), MKI H01p 1/15. Microwave power limiter]. Discoveries, inventions, 1992. No. 20.
19. Proektirovanie radiopriemnykh ustroystv: ucheb. posobie [Design of radio receivers: tutorial], ed. by A.P. Sivarsa. Moscow: Sov. radio, 1976, 488 p.
20. Spravochnik po uchebnomu proektirovaniyu priemno-usilitel'nykh ustroystv: ucheb. posobie [Reference book on educational design of receiving-amplifying devices: tutorial], ed. by M.K. Belkina. Kiev: Vishcha shkola, 1988, 472 p.

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

Андрянов Артур Валерьевич – АО «ТНИИС»; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; г. Таганрог, Россия.

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

Зикий Анатолий Николаевич – e-mail: zikiy50@mail.ru; тел.: 89185822295; кафедра информационнои безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Зламан Павел Николаевич – НКБ «МИУС», Южный федеральный университет; e-mail: otdel24d@mail.ru; г. Таганрог, Россия; ведущий инженер-конструктор.

Andrianov Artur Valer'evich – JSC "TNIIS"; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; Taganrog, Russia.

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

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – e-mail: zikiy50@mail.ru; phone: +79185822295; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zlaman Pavel Nikolaevich – НКБ "МИУС", Southern Federal University; e-mail: otdel24d@mail.ru; Taganrog, Russia; leading design engineer.

УДК 004.047

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-270-280

С.А. Паньчев, А.И. Паньчев, А.В. Максимов**РЕАЛИЗАЦИЯ В БАЗИСЕ ПЛИС РЕЛЯТОРНЫХ КОНТРОЛИРУЮЩИХ
ОПРОСНЫХ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ**

Сформулированы требования к современным средствам технического контроля и функциональной диагностики оборудования для ответственных применений, одним из которых является обработка диагностической информации в темпе реального времени. Отмечено, что для работы с цифровыми диагностическими сигналами перспективными являются реляторные контролируемые опросные устройства, основанные на аппарате порядковой логики, дающей существенный временной выигрыш перед традиционной двоичной логикой. Аппаратная реализация порядково-логической опросной устройств в базисе ПЛИС наряду с очевидными преимуществами этапа разработки позволит осуществлять оперативную реконфигурацию внутренней структуры для адаптации к изменяющимся условиям функционирования объекта контроля. Рассмотрена аппаратная реализация двух известных устройств. Устройство переменного приоритета использовано для выявления зафиксировавшего отказ или сбоя датчика с возможностью установки номера датчика, с которого начнется опрос, и направления обхода датчиков. Устройство централизованного контроля группы объектов применено для поиска экстремального (максимального или минимального) цифрового диагностического сигнала с одновременным определением номера соответствующего датчика за один такт работы системы контроля и диагностики. Разработка комбинационных схем данных контролируемых опросных устройств выполнена средствами ISE Design Suite 14.7. Представлены положительные результаты тестирования алгоритмов работы созданных моделей, сведенные в таблицы состояний входов и выходов схем и иллюстрируемые временными диаграммами двоичных сигналов на выводах схем. Дана оценка требуемых затрат ресурсов ПЛИС, выраженная в количестве логических элементов и пользовательских контактов. Также на примере приборов низкой интеграции и наиболее ресурсоемких образцов даны верхняя и нижняя оценки количество ПЛИС различных типов семейства Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 и отечественной серии 5576/5578 АО «КТЦ «Электроника». Установлено, что при количестве диагностических датчиков до 200 в зависимости от семейства ПЛИС для реализации одного контролирующего опросного устройства требуется до 17 микросхем низкой интеграции и до 7 ресурсоемких микросхем.

Техническая функциональная диагностика; порядковая логика; переменный приоритет; ПЛИС.

S.A. Panychev, A.I. Panychev, A.V. Maksimov**IMPLEMENTATION OF RELATIONAL DEVICES OF DIGITAL SIGNALS
MONITORING AND POLLING IN THE FPGA BASIS**

The requirements for modern means of technical control and functional diagnostics of equipment for critical applications are formulated, one of which is the processing of diagnostic information at a real-time pace. It is noted that for working with digital diagnostic signals, rela-

tional monitoring polling devices based on the apparatus of ordinal logic, which gives a significant time gain over traditional binary logic, are promising. The hardware implementation of ordinal-logical polling devices in the FPGA basis, along with the obvious advantages of the development stage, will allow for operational reconfiguration of the internal structure to adapt to the changing operating conditions of the control object. The hardware implementation of two known devices is considered. A variable priority device is used to identify the sensor that has detected a failure or malfunction, with the possibility of setting the sensor number from which the survey will begin, and the direction of traversing the sensor tuple. The device of centralized control of a group of objects is used to search for an extreme (maximum or minimum) digital diagnostic signal with simultaneous determination of the number of the corresponding sensor in one clock cycle of the monitoring and diagnostic system. The development of combinational data schemes of monitoring survey devices was carried out by means of ISE Design Suite 14.7. The positive results of testing the algorithms of the created models are presented, summarized in tables of the states of the inputs and outputs of the circuits and illustrated by time diagrams of binary signals at the terminals of the circuits. An estimate of the required FPGA resource costs is given, expressed in the number of logical elements and user contacts. Also, using the example of low integration devices and the most resource-intensive samples, the upper and lower estimates of the number of FPGAs of various types of the Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 families and the domestic 5576/5578 series of JSC KTC Electronics are given. It is established that with the number of diagnostic sensors up to 200, depending on the FPGA family, up to 17 low integration chips and up to 7 resource-intensive chips are required to implement one monitoring polling device.

Technical functional diagnostics; ordinal logic; variable priority; FPGA.

Введение. Средства контроля и диагностики (СКД) функционального состояния технического объекта являются неотъемлемой частью оборудования для ответственных применений, в частности, бортового радиоэлектронного оборудования летательных и космических аппаратов [1–8]. К современным встроенным иерархическим системам диагностирования и самодиагностирования сложного электронного оборудования предъявляются требования [9, 10]:

- ◆ быстродействие, обеспечивающее работу в темпе реального времени;
- ◆ непрерывный сбор и распределение данных от аналоговых и цифровых измерительных датчиков функциональных контрольных точек (ФКТ), встроенных в диагностируемое оборудование для отображения его текущего состояния;
- ◆ обнаружение и локализация отказов оборудования;
- ◆ парирование сбоев и отказов за счет использования процедур динамического перераспределения выполняемых задач на имеющиеся работоспособные ресурсы.

Традиционное решение проблемы предполагает введение избыточности того или иного вида, которая обеспечивается комплексом аппаратно-программных методов контроля работоспособности, диагностики состояния и локализации отказавшего элемента [11].

СКД относятся к классу устройств с высокой приоритетностью обслуживания в общем комплексе оборудования, что накладывает жесткие требования по минимизации показателей времени ожидания, обслуживания и восстановления СКД [12, 13]. В этой связи для контроля цифровых диагностических сигналов перспективными являются реляторные контролирующие опросные устройства (КОУ), основанные на аппарате порядковой логики, дающей существенный временной выигрыш перед традиционной двоичной логикой при решении задач ранжирования числовых массивов, выбора экстремального элемента в массиве, определения его номера и т.п. [14–16].

Проводится много исследований относительно новых подходов к реализации отказоустойчивых систем в базисе ПЛИС, которые благодаря своей гибкой структуре позволяют не только выполнять сложные проекты на одном кристалле и проводить многоуровневую верификацию на всех этапах разработки, но и осуществлять оперативную реконфигурацию внутренней структуры в процессе их функционирования [17, 18].

Постановка задачи. Целью работы является реализация в базе ПЛИС контролируемых опросных устройств, входящих в состав СКД реального времени и основанных на выполнении операций порядковой логики, и оценка требуемых для этого аппаратных ресурсов.

Анализ проблемы. К настоящему времени разработано несколько типов порядково-логических устройств, которые можно использовать в роли КОУ в составе СКД реального времени.

Так, устройство переменного приоритета [19] способно выявить зафиксированную отказ ФКТ, при этом в начале поиска задается номер ФКТ с высшим приоритетом, с которой будет начат опрос, и имеется возможность изменения направления опроса в сторону следующей по приоритету ФКТ. Устройство данного типа обозначим КОУ1. Второе устройство, реализующее способ централизованного контроля группы объектов [20], способно производить поиск экстремального (максимального или минимального) двоичного сигнала, являющегося оцифрованным значением диагностируемого параметра, с одновременным определением номера выработавшей этот сигнал ФКТ. Устройство данного типа обозначим КОУ2.

Основными преимуществами ПЛИС с точки зрения их использования для реализации релейных КОУ в составе СКД являются возможность программирования или изменения конфигурации непосредственно в диагностической системе, наличие средств автоматизированного проектирования для моделирования устройств в базе ПЛИС, относительная простота комплексирования с диагностируемым оборудованием [21].

Для разработки и симуляции работы релейных КОУ цифровых сигналов используем прикладной программный пакет ISE Design Suite 14.7.

Реализация и тестирование КОУ в базе ПЛИС. На рис. 1 представлены символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ1 с управляемыми приоритетом и направлением поиска, предназначенного для обслуживания четырех ФКТ с целью определения номера зафиксированной отказ ФКТ.

На входы КОУ1 x_1, x_2, x_3, x_4 подаются однобитовые двоичные значения сигналов ФКТ, отказ индицируется единичным состоянием. Приоритетность поиска задается двоичным вектором U на входах u_1, u_2, u_3, u_4 , содержащим код адреса ФКТ, с которой будет начат опрос. Направление обхода ФКТ (прямое или обратное) задается двоичным вектором S на входах s_1, s_2 . Выходы y_1, y_2, y_3, y_4 определяют побитовый адрес зафиксированной отказ ФКТ. В случае отсутствия отказов на всех выходах устанавливаются нулевые состояния. Управление приоритетами и порядком поиска осуществляет программа, регулирующая работу СКД. После обслуживания запроса производится операция сброса ячейки регистра, в которой этот запрос хранился до обслуживания

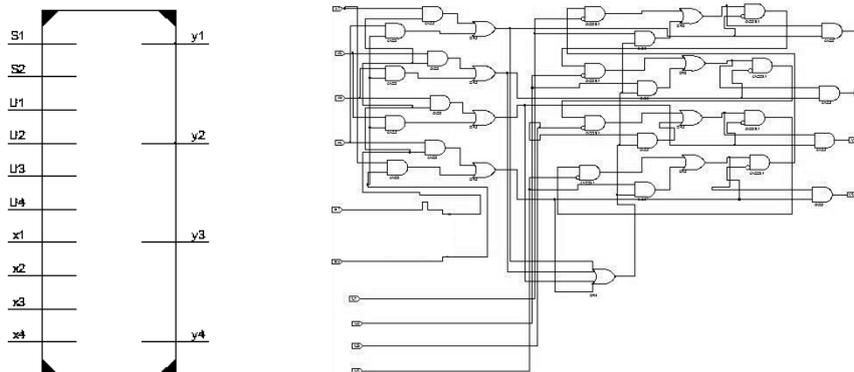


Рис. 1. Символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ1

Единичным состоянием входа s1 задается прямой порядок опроса ФКТ (в направлении увеличения номера), при этом на выходе двоичный код номера ФКТ с отказом формируется начиная с младшего разряда. Единичным состоянием входа s2 задается обратный порядок опроса ФКТ (в направлении уменьшения номера), при этом прямой код номера ФКТ с отказом формируется начиная со старшего разряда. Одинаковые значения на входах s1 и s2 является запрещенным состоянием.

В табл. 1 приведены состояния входов и выходов устройства на различных интервалах времени для тестового примера симуляции работы КОУ1. На рис. 2 приведены соответствующие временные диаграммы на выводах данного устройства.

Таблица 1

Результаты симуляции работы КОУ1

Интервал, нс	Входы										Выходы				
	x1	x2	x3	x4	u1	u2	u3	u4	s1	s2	y1	y2	y3	y4	
0...100	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
100...200	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
200...300	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
300...400	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
400...500	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
500...600	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1

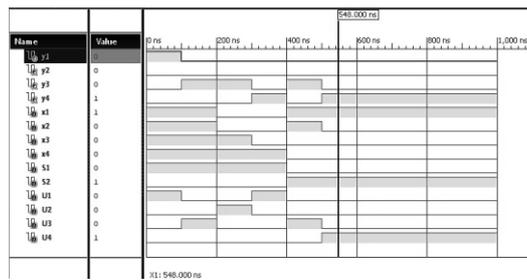


Рис. 2. Пример симуляции работы КОУ1

Анализ состояния выводов комбинационной схемы КОУ1 подтверждает правильность функционирования устройства:

- ◆ на интервале 0...100 нс на всех четырех ФКТ задан отказ (x1=1, x2=1, x3=1, x4=1); приоритетной указана первая ФКТ (u1=1); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y1, двоичный код номера выбранной ФКТ 1000; результат верный;
- ◆ на интервале 100...200 нс на всех четырех ФКТ задан отказ (x1=1, x2=1, x3=1, x4=1); приоритетной указана третья ФКТ (u3=1); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y3, двоичный код номера выбранной ФКТ 0010; результат верный;
- ◆ на интервале 200...300 нс отказ задан на третьей и четвертой ФКТ (x3=1, x4=1); приоритетной указана вторая ФКТ (u2=1), на которой отказа нет (x2=0); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y3, что соответствует ближайшей в прямом направлении ФКТ с отказом, двоичный код номера выбранной ФКТ 0010; результат верный;
- ◆ на интервале 300...400 нс отказ задан на четвертой ФКТ (x4=1); приоритетной указана первая ФКТ (u1=1), на которой отказа нет (x1=0); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y4, что соответствует ближайшей в прямом направлении ФКТ с отказом, двоичный код номера выбранной ФКТ 0001; результат верный;

◆ на интервале 400...500 нс отказ задан на первой и второй ФКТ ($x_1=1$, $x_2=1$); приоритетной указана третья ФКТ ($u_3=1$), на которой отказа нет ($x_3=0$); порядок поиска задан обратный ($s_2=1$); единица сформирована на выходе u_3 , двоичный код номера выбранной ФКТ начиная со старшего разряда 0010, код начиная с младшего разряда 0100, что соответствует ближайшей в обратном направлении обхода ФКТ с отказом; результат верный;

◆ на интервале 500...600 нс отказ задан на первой ФКТ ($x_1=1$); приоритетной выбрана четвертая ФКТ ($u_4=1$), на которой отказа нет ($x_4=0$); порядок проверки задан обратный ($s_2=1$); двоичный код номера выбранной ФКТ начиная со старшего разряда 0001, код начиная с младшего разряда 1000, что соответствует ближайшей в обратном направлении обхода ФКТ с отказом; результат верный.

Разработанная комбинационная схема КОУ1 очевидным образом масштабируется на произвольное количество n опрашиваемых ФКТ. Достоинствами КОУ1 являются:

- ◆ количество реализуемых приоритетов равно $2n!$;
- ◆ возможность динамически в темпе реального времени перестраивать приоритеты обслуживания ФКТ.

Основные недостатки КОУ1:

- ◆ рост аппаратных затрат пропорционален увеличению числа ФКТ;
- ◆ при увеличении числа ФКТ $n > 20 \dots 25$ велика вероятность возникновения эффекта «гонки сигналов»;
- ◆ ограниченное число уровней приоритетов, равное $2C_n^1$.

На рис. 3 приведена оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ1 в базе ПЛИС. Рассмотрены ПЛИС, представляющие семейства Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 [22] и отечественные серии 5576/5578 АО «КТЦ «Электроника» [23]. Выбрано по два представителя каждого семейства – приборы низкой интеграции и наиболее ресурсоемкие изделия.

Из рис. 3,а видно, что количество требуемых логических элементов N_{LC} и пользовательских контактов $N_{I/O}$ ПЛИС определяются только числом обслуживаемых ФКТ n и растут линейно. Требование по количеству пользовательских контактов является более жестким, поскольку их количество примерно вчетверо больше числа логических элементов.

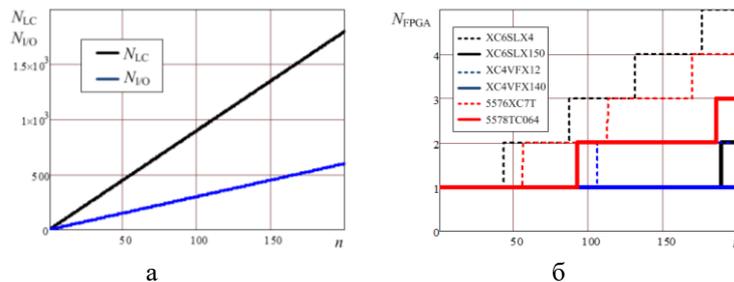


Рис. 3. Оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ1 в базе ПЛИС: а – количество логических элементов и пользовательских контактов; б – количество ПЛИС различных типов

График на рис. 3,б демонстрирует изменение требуемого количества ПЛИС N_{FPGA} для реализации КОУ1 при увеличении числа обслуживаемых ФКТ. Для реализации КОУ1 с обслуживанием до 200 ФКТ требуется от 1 до 3 ресурсоемких ПЛИС (сплошные линии) и от 2 до 5 ПЛИС низкой интеграции (пунктирные линии) в зависимости от семейства.

На рис. 4 представлены символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ2 для выбора экстремального цифрового диагностического сигнала и одно-временного определения номера соответствующей ФКТ из трех обслуживаемых.

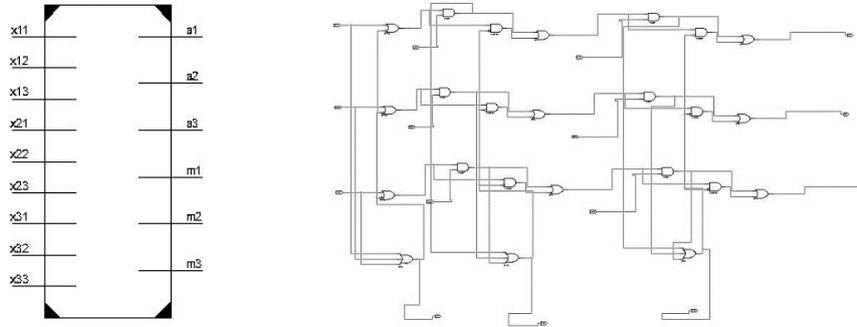


Рис. 4. Символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ для определения экстремального диагностического сигнала и номера соответствующей ФКТ

На входы КОУ2 подаются цифровые диагностические сигналы, считываемые из регистров, содержащих слова состояния каждой ФКТ, биты поступают отдельно на входы x11, x12, x13, x21, x22, x23, x31, x32, x33. Слово состояния каждой ФКТ (ее номер соответствует первому индексу в обозначении входа) состоит из трех бит (второй индекс в обозначении входа). На выходах a1, a2, a3 формируется прямой код номера ФКТ с экстремальным значением диагностического сигнала; на выходах m1, m2, m3 формируется прямой код этого экстремального значения. Опрос производится с абсолютным приоритетом в порядке возрастания номеров ФКТ. Для выбора максимального сигнала в регистрах ФКТ слова состояния записываются в прямом коде, для выбора минимального значения – в обратном коде.

Считывание регистров состояния ФКТ, выработка величины экстремума и номера ФКТ производятся по запросу из СКД, обновление регистров – по команде сброса из СКД.

В табл. 2 приведены результаты тестирования работы КОУ2 для двух наборов сигналов ФКТ. На рис. 5 представлены соответствующие временные диаграммы на выводах данного устройства.

Таблица 2

Результаты тестирования работы КОУ2

Тест	Входы									Выходы					
	x11	x12	x13	x21	x22	x23	x31	x32	x33	a1	a2	a3	m1	m2	m3
1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1

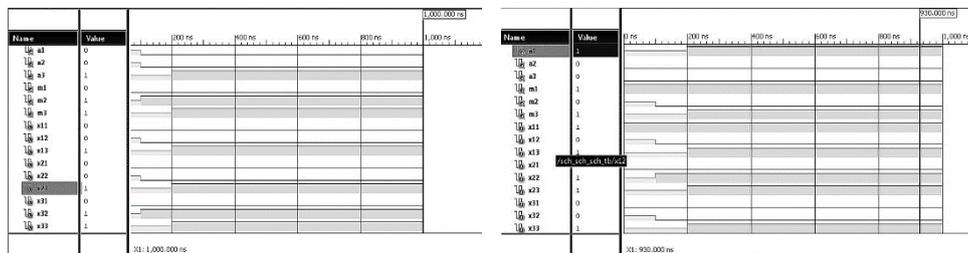


Рис. 5. Пример симуляции работы КОУ2

Как следует из табл. 2 и рис. 5, комбинационная схема КОУ2 работает корректно:

- ◆ Тест 1: максимальным является сигнал третьей ФКТ; сформированы код номера ФКТ 001 на выходах a_1, a_2, a_3 и код максимального сигнала 011 на выходах m_1, m_2, m_3 ; результат верный;

- ◆ Тест 2: максимальным является сигнал первой ФКТ; сформированы код номера ФКТ 100 на выходах a_1, a_2, a_3 и код максимального сигнала 101 на выходах m_1, m_2, m_3 ; результат верный.

Разработанная комбинационная схема КОУ2 очевидным образом масштабируется на произвольное количество n опрашиваемых ФКТ и произвольную разрядность слова состояния ФКТ. Достоинства КОУ2:

- ◆ значение экстремального сигнала и номер соответствующей ФКТ вырабатываются за один такт работы СКД;
- ◆ возможность выбора максимального или минимального сигнала;
- ◆ возможность упорядочивания массива значений сигналов ФКТ за один цикл, если на каждом такте выбранный экстремальный сигнал и номер ФКТ сохранять в памяти и исключать из дальнейшего анализа.

На рис. 6 приведена оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ2 в базе ПЛИС при различных значениях разрядности $m_{\text{АЦП}}$ слова состояния ФКТ. Из рис. 6,а видно, что количество требуемых логических элементов N_{LC} и пользовательских контактов $N_{\text{I/O}}$ ПЛИС определяются числом обслуживаемых ФКТ n и разрядностью цифровых диагностических сигналов $m_{\text{АЦП}}$, при этом рост N_{LC} и $N_{\text{I/O}}$ имеет линейный характер. Увеличение разрядности АЦП с 4 до 14 приводит к росту N_{LC} и $N_{\text{I/O}}$ примерно втрое.

График на рис. 6,б демонстрирует изменение требуемого количества N_{FPGA} ПЛИС указанных ранее типов для реализации КОУ2 при увеличении числа обслуживаемых ФКТ с учетом разрядности слова состояния ФКТ $m_{\text{АЦП}}=14$. Для реализации КОУ2 с обслуживанием до 200 ФКТ требуется от 3 до 7 ресурсоемких ПЛИС и от 6 до 14 ПЛИС низкой интеграции в зависимости от семейства.

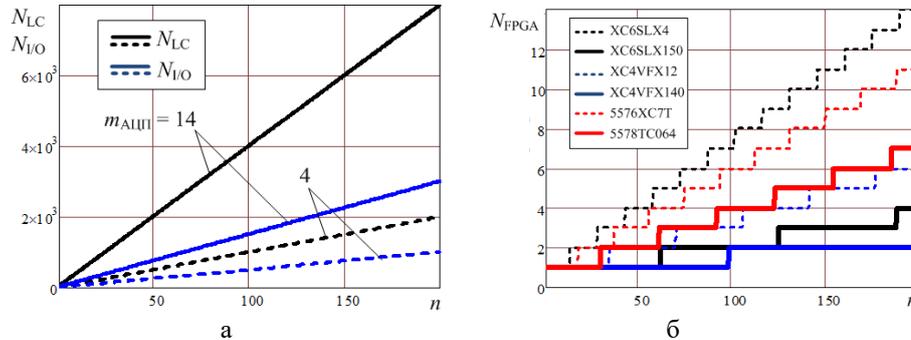


Рис. 6. Оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ2 в базе ПЛИС:
 а – количество логических элементов и пользовательских контактов;
 б – количество ПЛИС различных типов

В табл. 3 сведены основные параметры и требуемое число ПЛИС различных типов для реализации рассматриваемых КОУ при количестве опрашиваемых ФКТ $n=200$ и разрядности диагностических сигналов $m_{\text{АЦП}}=14$.

Таблица 3

Основные характеристики и требуемое число ПЛИС для реализации КОУ

ПЛИС	Xilinx				АО «КТЦ «Электроника»	
	Spartan-6		Virtex-4			
	XC6SLX4	XC6SLX150	XC4VFX12	XC4VFX140	5576XC7T	5578TC064
Размеры корпуса, мм	8 x 8	31 x 31	27 x 27	40 x 40	37 x 37	49 x 49
N_{LC}	3 840	147 443	12 312	142 128	1 728	55 856
$N_{I/O}$	132	576	320	896	170	279
N_{FPGA} КОУ1	5	2	2	1	4	3
N_{FPGA} КОУ2	14	4	6	3	11	7

Следует отметить, что ресурсоемкие ПЛИС имеют существенные размеры корпуса, что необходимо учитывать при проектировании конструкции СКД.

Заключение. Таким образом, в базе ПЛИС реализованы релейные контролируемые опросные устройства цифровых диагностических сигналов, базирующиеся на принципах порядковой логики и способные с минимальными временными затратами действовать в условиях динамически изменяющейся обстановки. Исследованные КОУ выявляют номер датчика, зафиксировавшего отказ или сбой оборудования, при этом устанавливается приоритет опроса датчиков и направление их обхода, или выделяют экстремальный диагностический сигнал и номер зафиксировавшего его датчика за один такт работы системы функционального допускового контроля и диагностики.

Установлено, что при обслуживании до 200 функциональных контрольных точек диагностических датчиков для создания приоритетного КОУ в зависимости от семейства ПЛИС требуется от 1 до 3 корпусов ресурсоемких ПЛИС и от 2 до 5 ПЛИС низкой интеграции. Создание КОУ, определяющего значение 14-разрядного экстремального сигнала и номер соответствующего датчика, потребует от 3 до 7 ресурсоемких ПЛИС и от 6 до 14 ПЛИС низкой интеграции в зависимости от семейства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков Н.С., Самхарадзе Т.Г., Рыбин В.М. Построение универсальной встроенной иерархической системы диагностирования сложных радиоэлектронных комплексов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 4. – С. 46-50.
2. Федосеев Е.П. Основные технологии создания высоконадежных бортовых вычислительных систем // Тр. ГосНИИАС. Вопросы авионики. – 2015. – Вып. 3. – С. 3-15.
3. Hahn M., Elsner G. Advanced Integrated Control and Data Systems for Constellation Satellites // MAPLD International Conference. NASA Office of Logic Design, Washington, USA. – 2002. – Pp. 217-225.
4. Hayden S., Christa S., Shulman S. Advanced Diagnostic System on Earth Observing One // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2005.
5. Mirko Jakovlievic, Complexity Design Considerations for Integrated Modular Avionics. – Civil Avionics International Forum, China. – April, 2014.
6. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems // Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003. – Guadelajare. – 2003. – P. 8.
7. Eveleens Rene L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing Mission Systems Engineering //– Educational Notes RTO-EN-SCI-176. – 2006. – Neuilly-sur-Seine, November, France. – RTO, Paper 2. – Pp. 2-1-2-22.
8. Fedosov E.A. IMA Russian Program – Overall presentation // European and Russian Joint Avionics Forum, Moscow. – 2009. – 15 p.

9. Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Виртуальное моделирование физических процессов в космической аппаратуре при построении кибернетических систем // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2018. – № 4. – С. 36-44.
10. Wah B.W. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, Vol. 1. – Wiley-interscience, 2008.
11. Захаров Н.А., Клетиков В.И., Подхватилин Д.С. Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2018. – № 3. – С. 3-12.
12. Вагин В.Н., Оськин П.В. Многоагентная моделирующая подсистема комплексов диагностики на основе моделей устройств // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2006. – № 6. – С. 131-144.
13. Бакулин В.Н., Малков С.Ю., Гончаров В.В. Ковалев В.И. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем. – М.: Физматлит, 2006.
14. Sergey Panychev, Vyacheslav Guzik, Anatoly Samoilenko, Andrey Panychev, The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application // MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists «Space Engineering». – DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.
15. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics", Russia, Moscow, May 12–14, 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
16. Самойленко А.П., Панычев А.И., Панычев С.А. Синтез контроллера внешних прерываний с динамически изменяемым приоритетом // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем*. 2016: Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИПИМ РАН, 2016. – Ч. III. – С. 212-219.
17. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. – 2012. – № 6. – С. 231-241.
18. Киселев В.В., Суворов Н.А. Метод диагностики цифровых схем с программируемыми ПЛИС на этапе изготовления // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. – 2015. – № 14. – С. 97-107.
19. Самойленко А.П., Самойленко И.А., Яцко Ф.Г. Устройство переменного приоритета. SU № 1383353. А1. – А.С. СССР. GO6F 9/46. Бюллетень № 11. 1988.
20. Самойленко А.П., Усенко О.А. Способ централизованного контроля N объектов. – Патент № 2198418 RU. 7G 05 B2 3/02. Бюллетень № 4. 2003.
21. Телец В., Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2005. – № 6 (64). – С. 44-49.
22. URL: <https://www.xilinx.com/> (дата обращения: 20.06.2022).
23. URL: <https://www.edc-electronics.ru/> (дата обращения: 20.06.2022).

REFERENCES

1. Shcherbakov N.S., Samharadze T.G., Rybin V.M. Postroenie universal'noy vstroennoy ierarkhicheskoy sistemy diagnostirovaniya slozhnykh radioelektronnykh kompleksov [Construction of a universal integrated hierarchical system for diagnosing complex radioelectronic complexes], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2012, No. 4, pp. 46-50.
2. Fedoseev E.P. Osnovnye tekhnologii sozdaniya vysokonadezhnykh bortovykh vychislitel'nykh system [Basic technologies for creating highly reliable onboard computing systems], *Trudy GosNIAS. Voprosy avioniki* [Proceedings of GosNIAS. Avionics issues], 2015, Issue 3, pp. 3-15.
3. Hahn M., Elsner G. Advanced Integrated Control and Data Systems for Constellation Satellites, *MAPLD International Conference. NASA Office of Logic Design, Washington, USA. 2002*, pp. 217-225.
4. Hayden S., Christa S., Shulman S. Advanced Diagnostic System on Earth Observing One, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2005.
5. Mirko Jakovlievic, Complexity Design Considerations for Integrated Modular Avionics. Civil Avionics International Forum, China. April, 2014.

6. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems, *Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003*. Guadelajare, 2003, pp. 8.
7. Eveleens Rene L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing Mission Systems Engineering, *Educational Notes RTO-EN-SCI-176*, 2006. Neuilly-sur-Seine, November, France? RTO, Paper 2, pp. 2-1-2-22.
8. Fedosov E.A. IMA Russian Program – Overall presentation, *European and Russian Joint Avionics Forum, Moscow, 2009*, 15 p.
9. Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Yu. Virtual'noe modelirovanie fizicheskikh protsessov v kosmicheskoy apparature pri postroenii kiberneticheskikh sistem [Virtual modeling of physical processes in space equipment in the construction of cybernetic systems], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2018, No. 4, pp. 36-44.
10. Wah B.W. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, Vol. 1. Wiley-interscience, 2008.
11. Zakharov N.A., Klepikov V.I., Podkhvilin D.S. Upravlenie izbytochnost'yu setevykh raspredelennykh sistem neobsluzhivaemoy avioniki [Redundancy management of network distributed systems of unattended avionics], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2018, No. 3, pp. 3-12.
12. Vagin V.N., Os'kin P.V. Mnogoagentnaya modeliruyushchaya podsystema kompleksov diagnostiki na osnove modeley ustroystv [Multi-agent modeling subsystem of diagnostic complexes based on device models], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2006, No. 6, pp. 131-144.
13. Bakulin V.N., Malkov S.Yu., Goncharov V.V. Kovalev V.I. Upravlenie obespecheniem stoykosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Stability assurance management of complex technical systems]. Moscow: Fizmatlit, 2006.
14. Sergey Panychev, Vyacheslav Guzik, Anatoly Samoilenko, Andrey Panychev, The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application, *MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists «Space Engineering»*. DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.
15. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process, *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Proceedings. Moscow: National Research University "Higher School of Economics", Russia, Moscow, May 12–14, 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
16. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Sintez kontrollera vneshnikh preryvaniy s dinamicheski izmenyaemym prioritetom [Synthesis of an external interrupt controller with a dynamically variable priority], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem. 2016: Sb. trudov* [Problems of developing promising micro- and nanoelectronic systems. 2016. Collection of works], pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. – Moscow: IPPM RAS, 2016. Part II, pp. 212-219.
17. Kon E.L., Freiman V.I. Podkhody k testovomu diagnostirovaniyu tsifrovyykh ustroystv [Approaches to test diagnostics of digital devices], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University], 2012, No. 6, pp. 231-241.
18. Kiselev V.V., Suvorov N.A. Metod diagnostiki tsifrovyykh skhem s programmiruemyimi PLIS na etape izgotovleniya [Diagnostic method of digital circuits with programmable FPGAs at the manufacturing stage], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University], 2015, No. 14, pp. 97-107.
19. Samoilenko A.P., Samoilenko I.A., Yatsko F.G. Ustroystvo peremennogo prioriteta [Device of variable priority], SU No. 1383353. A1, A.S. USSR. GO6F 9/46, Bulletin No. 11, 1988.
20. Samoilenko A.P., Usenko O.A. Sposob tsentralizovannogo kontrolya N ob"ektov [Method of centralized control of N objects], Patent No. 2198418 RU, 7G 05 B2 3/02, Bulletin No. 4, 2003.
21. Telec V., Cybin S., Bystrickij A., Pod'yapol'skij S. PLIS dlya kosmicheskikh primeneniy. Arkhitekturnye i skhemotekhnicheskie osobennosti [FPGA for space applications. Architectural and circuit design features], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business], 2005, No. 6(64), pp. 44-49.
22. Available at: <https://www.xilinx.com/> (accessed 20 June 2022).
23. Available at: <https://www.edc-electronics.ru/> (accessed 20 June 2022).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент В.Н. Пуховский.

Панычев Сергей Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: panychev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.

Панычев Андрей Иванович – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; тел.: 88634371634; к.т.н.; доцент.

Максимов Александр Викторович – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; к.т.н.; доцент.

Panychev Sergey Andreevich – Southern Federal University; e-mail: panychev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.

Panychev Andrey Ivanovich – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.

Maksimov Alexander Viktorovich – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.518.5

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-280-289

А.В. Хлуденев

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И СОПТ

Целью исследования является разработка способа параметрического согласования устройств контроля изоляции, систем оперативного постоянного тока и дискретных входов релейной защиты. Использование для питания устройств релейной защиты и других ответственных потребителей изолированных систем оперативного постоянного тока позволяет обеспечивать при их эксплуатации высокую надежность и безопасность. Бесперебойность электроснабжения этих потребителей должна обеспечиваться даже при коротких замыканиях на землю одного из полюсов сети оперативного тока. Гарантией высокой надежности электроснабжения является мониторинг сопротивления изоляции сети и оперативное выполнение ремонтных работ при его снижении ниже критического уровня, задаваемого уставкой. В статье рассматриваются причины, приводящие к опасным уровням асимметрии напряжений полюсов сети относительно земли и ложным срабатываниям дискретных входов релейной защиты при замыкании на землю подключенных к ним сигнальных линий. Предложен основанный на методе многовариантного анализа по постоянному току способ определения согласованных значений уставок контроля изоляции, параметров сети оперативного тока и параметров дискретных входов релейной защиты, при которых устраняются условия появления таких аварий. Также рассмотрено влияние устройств контроля изоляции в системах оперативного постоянного тока на асимметрию напряжений полюсов и работу релейной защиты. Предложена модификация активного метода мониторинга сопротивления изоляции, при которой не возникает дополнительная опасная асимметрия напряжений полюсов сети и дополнительные риски ложных срабатываний релейной защиты. Применение модифицированного метода мониторинга в условиях перекоса напряжений полюсов сети приводит к сужению рабочих участков статических характеристик измерительных преобразователей напряжений полюсов и тока утечки. Получены оценки возникающего в этих режимах увеличения погрешности при измерении сопротивления изоляции.

Система оперативного постоянного тока; сопротивление изоляции; устройство контроля изоляции; релейная защита; асимметрия напряжений; ложное срабатывание; погрешность измерения.

A.V. Khludenev

PARAMETRIC MATCHING OF INSULATION MONITORING DEVICES AND DC DISTRIBUTION SYSTEMS

The aim of the study is to develop a method for parametric matching of insulation monitoring devices, unearthed DC distribution systems and discrete inputs of relay protection. The use of unearthed DC distribution systems for power supply to relay protection devices and other responsible consumers makes it possible to ensure high reliability and safety dur-

ing their operation. It is necessary to ensure uninterrupted power supply to these consumers even in the event of a ground fault in one of the DC distribution network poles. Insulation monitoring of the network poles and the prompt execution of repair work when the insulation resistance falls below the critical level set by the response value, are a guarantee of high reliability of power supply. The article discusses the reasons leading to dangerous levels of pole voltage unbalance and false triggering of relay protection discrete inputs during ground faults of the signal lines connected to them. A method based on multivariate DC analysis is proposed to determine the matched insulation monitoring response value with the DC network parameters and discrete inputs parameters, when the conditions for the occurrence of such accidents are excluded. The influence of insulation monitoring devices in a DC system on pole voltages unbalance and relay protection operation is also considered. A modification of the insulation monitoring active method is proposed, which does not create additional pole voltage unbalance and risks of relay protection misoperation. The operating range of the static characteristics of the pole voltages and leakage current measuring transducers is narrowed in the grid unbalanced modes by using a modified active insulation monitoring method. Estimates of the increase in the insulation resistance measurement error arising in these modes are obtained.

Unearthed DC distribution system; insulation resistance; insulation monitoring device; relay protection; voltage unbalance; misoperation; measurement error.

Введение. Низковольтные изолированные системы оперативного постоянного тока (СОПТ) используют для питания оборудования высоковольтных подстанций, в том числе, устройств релейной защиты. Для обеспечения высокой надежности и безопасности СОПТ при их эксплуатации должен быть обеспечен контроль сопротивления изоляции полюсов относительно земли. Требования к устройствам контроля изоляции (УКИ) устанавливает стандарт IEC 61557-8 [1].

При замене электромеханических реле на микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МПРЗА), а также замене традиционных реле контроля изоляции на современные электронные УКИ возникла проблема их эксплуатации на подстанциях. Проблема заключается в появлении случаев ложного срабатывания релейной защиты в момент замыкания на землю дискретного входа МПРЗА при асимметрии напряжений полюсов сети СОПТ.

Историческая справка. История вопроса связана с эволюцией требований к СОПТ и УКИ, сформулированных в стандартах ПАО "ФСК ЕЭС". В версии стандарта 2010 года [2] сформулированы требования к сопротивлению полюсов СОПТ относительно земли с учетом внутреннего сопротивления электроприемников (не менее 150 кОм). Определено требование к УКИ формировать сигнал в АСУ ТП при снижении сопротивления одного или двух полюсов сети СОПТ ниже 135 кОм.

На практике выполнять эти требования не всегда удавалось. Уставку предупредительной сигнализации УКИ традиционно занижали до уровня от 40 до 50 кОм, а аварийной – от 4 до 10 кОм. При использовании УКИ с высоким внутренним сопротивлением на землю неоднократно фиксировались ложные срабатывания МПРЗА. В стандарте [3] для формирования аварийного сигнала «земля в сети» определен порог 20 кОм. Эта мера не могла решить проблему.

Анализ причин ложных срабатываний МПРЗА [4, 5] выявил влияние внутреннего сопротивления УКИ на асимметрию напряжений полюсов. На основе опыта эксплуатации реле контроля изоляции с относительно низким сопротивлением обмотки [6, 7] для решения проблемы рекомендовано балансировать сеть резисторами сопротивлением до 9 кОм [5].

В 2012 году проведена ревизия стандарта [2], сформулированы требования к допустимому перекосу напряжений полюсов СОПТ относительно земли и требование к УКИ выполнять его мониторинг. Для исключения рисков неправильной работы МПРЗА сформулированы жесткие требования к входному сопротивлению и чувствительности дискретных входов [8, 9].

Стандарт [10] разработан под влиянием точки зрения, изложенной в [5]. Введено понятие блока формирования нейтрали (БНФ) для снижения перекоса напряжений полюсов сети и требование работы УКИ без отключения БНФ. Пересмотрены требования к уставкам УКИ (в диапазоне от 20 до 100 кОм). Стандарт подвергался критике [11] за недостаточную жесткость требований к сопротивлению симметрирующих сеть резисторов (не более 30 кОм).

В основе требований различных версий стандартов на СОПТ лежат конкурирующие частные решения. Этим можно объяснить сложность их выполнения в различных условиях. Поиск универсальных решений основан на методах расчета согласованных значений параметров СОПТ и УКИ, в том числе, на основе моделирования переходных процессов при коротком замыкании на землю дискретного входа [12], построения аналитических моделей СОПТ [13, 14, 15] и численного анализа статических режимов [16, 17].

Постановка задачи. Эквивалентная схема замещения СОПТ напряжением 220 В, питающей цепь дискретного входа МПРЗА с входным сопротивлением R_{in} , приведена на рис. 1. При включенном состоянии дискретного датчика типа сухой контакт SI логический сигнал на выходе изолированного оптроном формирователя $D_{in} = 1$. Элементы R_{iso+} , R_{iso-} , C^+ , C^- учитывают сопротивление изоляции и паразитные емкости полюсов сети на землю. Общее сопротивление изоляции $R_{iso} = R_{iso+} \parallel R_{iso-}$. Для снижения асимметрии напряжений полюсов $V_{asym} = V^+ + V^-$ относительно земли установлены резисторы R_d^+ , R_d^- .

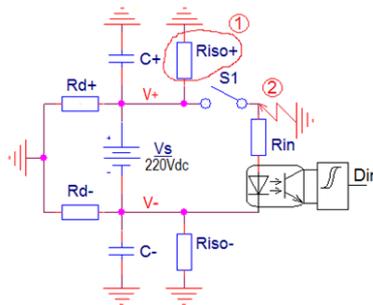


Рис. 1. Эквивалентная схема СОПТ

Рассмотрим случай, когда датчик SI выключен и произошло снижение сопротивления изоляции положительного полюса R_{iso+} . С момента $t = 0$ замыкания на землю линии, которой SI связан с дискретным входом, напряжение отрицательного полюса будет изменяться:

$$V^-(t) = V^-(0) \cdot e^{-t/\tau} + V^-(\infty) \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

где $\tau = (C^+ + C^-) (R_{iso} \parallel R_{in} \parallel R_d^+ \parallel R_d^-)$ постоянная времени цепи для $t > 0$. Аналитические решения для значений $V^-(0)$ и $V^-(\infty)$ приведены [5] и [15].

Дискретный вход будет находиться под напряжением $(-V^-(t))$. Ложное срабатывание дискретного входа (рис. 2) произойдет через интервал задержки срабатывания t_{delay} при превышении его порога срабатывания V_{tr} :

$$|V^-(t_{delay})| \geq V_{tr}. \quad (2)$$

Ложное срабатывание дискретного входа является аварийным событием, которое может произойти вследствие кратного отказа:

1) критического асимметричного снижения сопротивления изоляции СОПТ, при котором выполняется условие (2);

2) короткого замыкания на землю проводника, подключенного к дискретному входу МПРЗА.

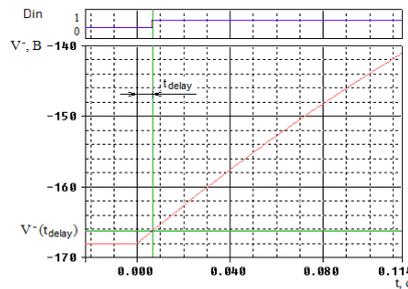


Рис. 2. Ложное срабатывание дискретного входа

Вероятность такого отказа ничтожно мала, если:

1) уровень уставки УКИ R_{isomin} согласован с параметрами дискретных входов V_{tr} , R_{in} , t_{delay} и параметрами СОПТ C^+ , C^- , $R_d = R_d^+ = R_d^-$ таким образом, что при $R_{iso} > R_{isomin}$ условие (2) не выполняется;

2) УКИ формирует сигнал при снижении R_{iso} к уровню уставки R_{isomin} , а оперативный персонал своевременно устраняет причины снижения.

Если уставка УКИ задана ниже допустимого уровня, то причины снижения сопротивления изоляции своевременно не будут устраняться. Вероятность ложного срабатывания дискретных входов повышается многократно.

Поиск способов определения согласованных значений параметров СОПТ, параметров дискретных входов и уставки УКИ является задачей исследования.

Общее решение задачи. Решение задачи поиска согласованных значений параметров может быть найдено в виде допустимых значений R_d для заданных значений $R_{iso+} = R_{isomin}$, $R_{iso-} = \infty$ (при максимальной асимметрии полюсов сети) и известных значениях параметров C^+ , C^- , V_{tr} , R_{in} , t_{delay} путем подстановки в (1) при выполнении условия:

$$|V^-(R_d, R_{iso+}, R_{in}, C^+, C^-, t = t_{delay})| < V_{tr}. \quad (3)$$

Если учитывать уровень допускаемой погрешности при измерении R_{iso} [1], а также погрешности определения значений C^+ , C^- и разброс параметров дискретных входов V_{tr} , R_{in} , t_{delay} , этот способ является неоправданно сложным.

Поиск решения можно существенно упростить, если от динамической задачи перейти к задаче статической. Время задержки срабатывания дискретных входов настраивается в диапазоне от 0 до 20 мс, а паразитные емкости полюсов сети составляют от 5 до 200 мкФ, значение R_{in} от 40 до 60 кОм [8, 9]. Будем полагать, что сопротивление изоляции R_{iso+} не менее 4 кОм, тогда $\tau \gg t_{delay}$. Чтобы получить решение для наилучшего случая ($t_{delay} = 0$), можно пренебречь изменением $V^-(t)$ в течение интервала t_{delay} . Тогда интересные соотношения параметров R_d , R_{iso+} , при которых невозможно ложное срабатывание дискретного входа, можно определить из условия:

$$|V^-(R_d, R_{iso+})| < V_{tr}. \quad (4)$$

Значения левой части (4) можно находить методом многовариантного анализа по постоянному току, используя схемные симуляторы. Уравнения цепи должны быть сформированы для $t = 0^-$ при отключенном дискретном входе.

Результаты компьютерного моделирования. Использовался симулятор OrCAD PSpice A/D v.17.2 и режим анализа DC Sweep [18]. На рис. 3 приведены результаты расчета, когда значение R_{iso+} изменялось по логарифмическому закону в диапазоне от 1 до 200 кОм в Primary Sweep, R_d принимало значения из ряда 9, 30, 100, 360 кОм в Secondary Sweep. Задаваясь уровнем V_{tr} , для любого значения R_d можно получить границы допустимых значений R_{iso+} , чтобы найти уставку. Напри-

мер, при использовании дискретных входов с $V_{tr} = 168$ В и приборов контроля изоляции серии Isometer компании Bender с $R_d = 360$ кОм [5] ложные срабатывания исключаются, если уставка УКИ будет настроена на уровне не ниже 152 кОм. При использовании аналогичных дискретных входов и УКИ «ЭКРА-СКИ» с $R_d = 9$ кОм [5] уставку можно снизить до 4 кОм.

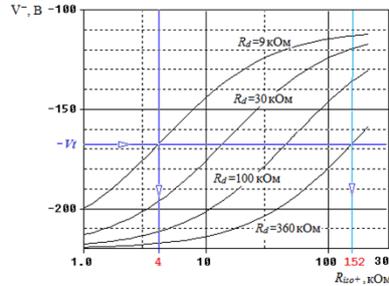


Рис. 3. Графики $V^-(R_{iso+})$ для заданных значений R_d

Чтобы определить предельно допустимое значение R_d по заданному значению V_{tr} и уровню уставки УКИ, удобнее поменять последовательность изменения R_{iso+} и R_d . На рис. 4 приведены результаты моделирования, когда значение R_d изменялось по логарифмическому закону в диапазоне от 9 до 360 кОм в Primary Sweep, сопротивление R_{iso+} принимало значения из ряда 20, 40, 135, 270 кОм в Secondary Sweep. Например, для дискретных входов с $V_{tr} = 168$ В и при уставке 20 кОм, значение R_d не должно превышать 45 кОм.

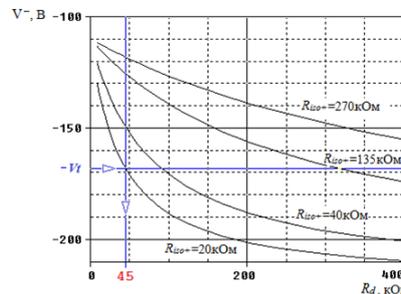


Рис. 4. Графики $V^-(R_d)$ для заданных значений R_{iso+}

Влияние УКИ. Мониторинг сопротивления изоляции в СОПТ основан на его непрерывном периодическом измерении. УКИ с активными методами измерения позволяют определять как симметричное, так и несимметричное снижение сопротивления изоляции полюсов, но производят помехоэмиссию и могут вызывать ложное срабатывание дискретных входов МПРЗА [5, 15, 19].

Активные методы измерения основаны на наложении на сеть постоянного тока переменного напряжения или двухполярных прямоугольных импульсов напряжения [15], на инъекции постоянного тока [20] или на коммутации резисторов между полюсами сети и землей [5]. Реализация последнего способа приведена на рис. 5. Потребители R_{load} получают питание от источника V_s . Резисторы $R1$, $R2$ поочередно подключаются к полюсам сети с помощью электронных ключей $S1$, $S2$. Управление ключами и измерение текущих значений напряжений полюсов $V^+(t)$, $V^-(t)$ и тока утечки на землю $I(t)$ выполняет микропроцессорный контроллер.

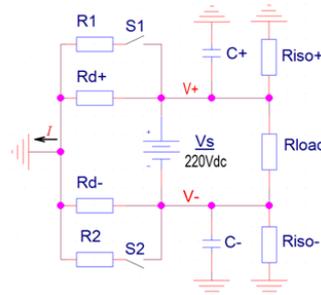


Рис. 5. Реализация активного метода измерения

Период коммутации состоит из четырех интервалов T1–T4, в течение которых ключи S1 и S2 находятся в состояниях:

- ◆ S1 включен и S2 выключен на интервале T1;
- ◆ S1 и S2 выключены на интервалах T2 и T4;
- ◆ S1 выключен и S2 включен на интервале T3.

После очередной коммутации S1, S2 их текущее состояние сохраняется до достижения установившихся значений (по уровню допустимой погрешности):

- ◆ V_0^+, V_0^- – напряжений полюсов и тока утечки I_0 на интервалах T2 и T4;
- ◆ V_1^+, V_1^- – напряжений полюсов и тока утечки I_1 на интервале T1;
- ◆ V_3^+, V_3^- – напряжений полюсов и тока утечки I_3 на интервале T3.

По результатам измерений общее сопротивление изоляции:

$$R_{iso} = \Delta V / \Delta I, \quad (5)$$

где $\Delta V = V_3^+ - V_1^+ = V_3^- - V_1^-$ (при неизменном значении V_s); $\Delta I = I_1 - I_3$.

Сопротивления изоляции полюсов:

$$R_{iso+} = V_s / (-V_0^- / R_{iso} - I_0), \quad (6)$$

$$R_{iso-} = V_s / (V_0^+ / R_{iso} + I_0). \quad (7)$$

УКИ создает дополнительную асимметрию напряжений полюсов при включении S1 и S2. На рис. 6 показана временная диаграмма напряжения отрицательного полюса при $R_d = 45$ кОм и $R_{iso+} = 20$ кОм. Дополнительное снижение ($V_0^- - V_1^-$) вследствие коммутации S1 достигает 5 вольт и может вызвать ложное срабатывание дискретных входов МПРЗА с $V_w \leq 173$ В.

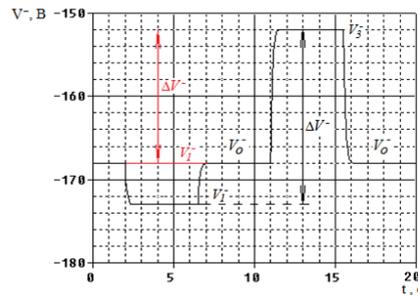


Рис. 6. Временные диаграммы напряжения $V^-(t)$

Для исключения этих рисков предлагается модифицированный алгоритм работы УКИ с активным методом измерения. При появлении критического перекоса напряжений полюсов V_{asym} необходимо отказаться от поочередной коммутации

резисторов $R1, R2$. В этом случае необходимо разрешить периодическую коммутацию только одного из них. Обозначим пределы допустимых значений перекоса напряжений полюсов V_{neg} и V_{pos} . Тогда УКИ должно работать по правилам:

- 1) если $V_{neg} < V_{asym} < V_{pos}$, то поочередная коммутация $R1$ и $R2$;
- 2) если $V_{asym} \geq V_{pos}$, то коммутация $R1$, при этом $V_3^+ = V_0^+$, $V_3^- = V_0^-$ и $I_3 = I_0$;
- 3) если $V_{asym} \leq V_{neg}$, то коммутация $R2$, при этом $V_1^+ = V_0^+$, $V_1^- = V_0^-$ и $I_1 = I_0$.

Измененный участок временной диаграммы $V(t)$ для третьего случая на рис. 6 выделен красным цветом. В случае замыкания на землю линии дискретного входа напряжение на нем не превысит 168 В.

При $V_{asym} \geq V_{pos}$ или $V_{asym} \leq V_{neg}$ и отказе от коммутации одного из элементов $R1$ или $R2$ перепады напряжения ΔV и тока утечки ΔI будут существенно снижены. Например, при $R_d = 45$ кОм и $R_{iso+} = 20$ кОм, $R_{iso-} = \infty$ перекося напряжений $V_{asym} = -116$ В, снижение ΔV (рис. 6) и ΔI (рис. 7) будет составлять около 25%. Это приведет к удвоению приведенной относительной погрешности измерения R_{iso} в наихудшем случае.

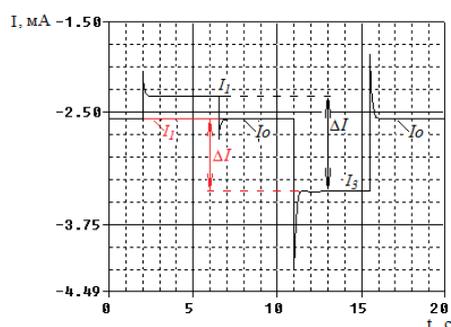


Рис. 7. Временная диаграмма тока утечки

Заключение. Несогласованность уровней уставок УКИ, сопротивления балансирующих сеть элементов и параметров дискретных входов создают условия для появления ложных срабатываний дискретных входов МПРЗА.

Предложен основанный на методе многовариантного анализа по постоянно-му току способ определения значений параметров балансирующих сеть элементов, согласованных с уставкой УКИ и параметрами дискретных входов. Эксплуатация СОПТ с согласованными значениями параметров позволяет исключить ложные срабатывания дискретных входов МПРЗА.

Предложен модифицированный алгоритм коммутации резистивных элементов между полюсами сети и землей при мониторинге сопротивления изоляции, который не создает дополнительные риски ложных срабатываний дискретных входов МПРЗА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEC 61557-8:2014 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1500 V d.c. – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures. – Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.
2. СТО 56947007-29.120.40.041-2010. Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.041-2010.pdf.
3. СТО 56947007-29.120.40.093-2011. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.120.40.093-2011.pdf>.
4. Tang W.X. Protection misoperations caused by single-point grounding of DC circuit and AC-DC interference and countermeasures // Electric Power Automation Equipment. – 2007. – No. 27 (9). – P. 123-125.

5. Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Особенности контроля изоляции в цепях оперативного постоянного тока 220 В // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 3. – С. 36-41.
6. Галкин И.А., Шаварин Н.И., Иванов А.Б. Реле контроля уровня сопротивлений изоляции полюсов сетей оперативного постоянного тока ООО НПП «ЭКРА» типа РКИЭ // Релейная защита и автоматизация. – 2010. – № 1. – С. 26-28.
7. Алимов Ю.Н., Быков К.В., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Контроль изоляции в цепях оперативного постоянного тока электрических станций и подстанций // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 3. – С. 38-45.
8. СТО 56947007-29.120.40.102-2011. Методические указания по инженерным расчетам в системах оперативного постоянного тока для предотвращения неправильной работы дискретных входов микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, при замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока подстанций ЕНЭС. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29-120-40-102-2011_n.pdf.
9. Гусев Ю.П., Монаков Ю.В. Предотвращение срабатываний дискретных входов микропроцессорных релейных защит при замыканиях на землю в системах оперативного постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 91-93.
10. СТО 56947007-29.120.40.262-2018. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.262-2018.pdf.
11. Галкин И.А., Виноградов А.Ю., Лопатин А.А. К вопросу о требованиях к оборудованию контроля сопротивления изоляции СОПТ, снижающих ложную работу устройств релейной защиты и автоматики // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 90-93.
12. Монаков Ю.В. Разработка рекомендаций по предотвращению срабатываний микропроцессорных средств защиты и автоматики энергообъектов от замыканий в системе оперативного тока: автореф. дис. кан. техн. наук. – М., 2013. – 20 с.
13. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems // Lecture Notes in Electrical Engineering. – Vol. 314. – Springer, 2014.
14. Olszowiec P. О выборе уставок устройств контроля изоляции сетей постоянного тока // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 166-175.
15. Olszowiec P. Influence of insulation monitoring devices on the operation of DC control circuits // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 50, No. 6, – P. 653-656.
16. Хлуденев А.В. Пофидерный контроль сопротивления изоляции изолированных сетей постоянного тока // Матер. II Международной научно-технической конференции «Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации». – Уфа: УГАТУ, 2019. – С. 213-217.
17. Khludenev A. Insulation Monitoring Impact on Relay Protection Malfunction // In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2020. – P. 58-61. – DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278485.
18. Fitzpatrick D. Analog Design and Simulation using OrCAD Capture and PSpice. – 2nd ed. – Newnes. – 2018. – 438 p.
19. Yow-Chyi Liu, En-Chih Chang, Yong-Lin Lee, Yu-Zhong Lin. Detection of Ground Insulation Faults in Ungrounded DC Power Supply Systems by Using a DC Current Injection Method // In Proceedings of the 2018 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2018). – Nagoya, Japan, 2018. – P. 349-355. – DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.154.
20. Wen C., Chen M. Research on DC grounding finder to effectively prevent microcomputer protection malfunction caused by one-point grounding of secondary circuit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 512: 4th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2020). – 012152. – DOI: 10.1088/1755-1315/512/1/012152.

REFERENCES

1. IEC 61557-8:2014 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.
2. СТО 56947007-29.120.40.041 Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» [Operational D.C. systems of substations. Technical requirements. JSC FGC UES standard], 2010. Available: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.041-2010.pdf.

3. STO 56947007-29.120.40.093 Rukovodstvo po proyektirovaniyu sistem operativnogo postoyannogo toka (SOPT) PS YENES. Tipovyye proyektnyye resheniya. Standart organizatsii OAO «FSK YEES» [D.C. Operative Systems Design Guide (DCOS) SS UNEG. Typical design decisions, JSC FGC UES Standard], 2011. Available: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.120.40.093-2011.pdf>.
4. Tang W.-X. Protection misoperations caused by single-point grounding of DC circuit and AC-DC interference and countermeasures, *Electric Power Automation Equipment*, 2007, No. 27 (9), pp. 123-125.
5. Alimov Yu.N., Galkin I.A., Shavarin N.I. Osobennosti kontrolya izolyatsii v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka 220 V [Features of insulation control in circuits of operational direct current 220V], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2011, No. 3, pp. 36-41.
6. Galkin I.A., Shavarin N.I., Ivanov A.B. Rele kontrolya urovnya soprotivleniy izolyatsii polyusov setey operativnogo postoyannogo toka OOO NPP «EKRA» tipa RKIE [Relay for monitoring the level of insulation resistance of poles of operational D.C. networks NPP "EKRA" LLC, type RKIE], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2010, No. 1, pp. 26-28.
7. Alimov YU.N., Bykov K.V., Galkin I.A., Shavarin N.I. Kontrol' izolyatsii v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka elektricheskikh stantsiy i podstantsiy [Insulation control in operating D.C. circuits of power plants and substations], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2013, No. 3, pp. 38-45.
8. STO 56947007-29.120.40.102-2011. Metodicheskiye ukazaniya po inzhenernym raschetam v sistemakh operativnogo postoyannogo toka dlya predotvrashcheniya nepravil'noy raboty diskretnykh vkhodov mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki, pri zamykaniyakh na zemlyu v tsepyakh operativnogo postoyannogo toka podstantsiy ENES. Standart organizatsii OAO «FSK EES» [Methodical guidelines for engineering calculations in operational D.C. systems to prevent incorrect operation of discrete inputs of microprocessor relay protection and automation devices, in case of ground faults in the operational D.C. circuits of UNEG substations. JSC FGC UES standard]. Available: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29-120-40-102-2011_n.pdf.
9. Gusev Yu.P., Monakov Yu.V. Predotvrashcheniye srabatyvaniy diskretnykh vkhodov mikroprotsessornykh releynykh zashchit pri zamykaniyakh na zemlyu v sistemakh operativnogo postoyannogo toka [Prevention misoperation of discrete inputs of microprocessor relay protection of ground-fault cases in the operational D.C. systems], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Izvestiya vuzov. Electromechanics], 2013, No. 1, pp. 81-83.
10. STO 56947007-29.120.40.262 Rukovodstvo po proyektirovaniyu sistem operativnogo postoyannogo toka (SOPT) PS YENES. Tipovyye proyektnyye resheniya. Standart organizatsii OAO «FSK YEES» [D.C. Operative Systems Design Guide (DCOS) SS UNEG. Typical design decisions, JSC FGC UES Standard], 2018. Available: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.262-2018.pdf.
11. Galkin I.A., Vinogradov A.Yu., Lopatin A.A. K voprosu o trebovaniyakh k oborudovaniyu kontrolya soprotivleniya izolyatsii SOPT, snizhayushchikh lozhnuyu rabotu ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki [On the issue of requirements for equipment for monitoring the insulation resistance of ODCS, that reducing the false operation of relay protection and automation devices], *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2019, No. 1, pp. 90-93.
12. Monakov Yu.V. Razrabotka rekomendatsiy po predotvrashcheniyu srabatyvaniy mikroprotsessornykh sredstv zashchity i avtomatiki energoob"yektov ot zamykaniy v sisteme operativnogo toka: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of recommendations for the prevention of microprocessor-based protection and automation of power facilities from short circuits in the operating current system: cand. of eng. sc. diss. abstr.]. Moscow, 2013, 20 p.
13. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 314. Springer, 2014.
14. Olszowiec P. O vybore ustavok ustroystv kontrolya izolyatsii setey postoyannogo toka [About the response values choice of DC networks insulation monitoring devices], *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2013, Vol. 21, pp. 166-175.
15. Olszowiec P. Influence of insulation monitoring devices on the operation of DC control circuits, *Power Technology and Engineering*, March 2017, Vol. 50, no. 6, pp. 653-656. DOI: 10.1007/s10749-017.

16. *Khludenev A.V.* Pofidernyy kontrol soprotivleniya izolyatsii izolirovannykh setey postoyannogo toka [Feeder insulation monitoring of unearthed DC distribution networks], *Mater. II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel'noy informatsii»* [Materials of the II International Scientific and Technical Conference "Problems of Receiving, Processing and Transmitting Measurement Information"]. Ufa: USATU, 2019, pp. 213-217.
17. *Khludenev A.* Insulation Monitoring Impact on Relay Protection Malfunction, *In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russian Federation, 2020*, pp. 58–61. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278485.
18. *Fitzpatrick D.* Analog Design and Simulation using OrCAD Capture and PSpice, 2nd ed., Newnes, 2018, 438 p.
19. *Yow-Chyi Liu, En-Chih Chang, Yong-Lin Lee, Yu-Zhong Lin.* Detection of Ground Insulation Faults in Ungrounded DC Power Supply Systems by Using a DC Current Injection Method // *In Proceedings of the 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPSE 2018), Nagoya, Japan, 2018*, pp. 349-355. DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.154.
20. *Wen C., Chen M.* Research on DC grounding finder to effectively prevent microcomputer protection malfunction caused by one-point grounding of secondary circuit, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 512: 4th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2020), Hangzhou, China, 2020*, p. 012152. DOI: 10.1088/1755-1315/512/1/012152.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.М. Тутаев.

Хлуденев Александр Владимирович – Оренбургский государственный университет; e-mail: avhkludenev@yandex.ru; г. Оренбург, Россия; тел.: +73532372874; кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники; к.т.н.; доцент.

Khludenev Alexander Vladimirovich – Orenburg State University; e-mail: avhkludenev@yandex.ru; Orenburg, Russia; phone: +73532372874; industrial electronics and information measuring engineering department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.786, 62-529

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-289-299

Т.Г. Цой

ОЦЕНКА СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОЙ КАМЕРЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА «СЕРВОСИЛА ИНЖЕНЕР» В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Современные задачи специальных областей робототехники, включая поисково-спасательные операции в городских населенных пунктах, ставят ряд вызовов перед мобильной робототехникой. Одним из важных требований к алгоритмическому и программному обеспечению робота являются возможности автономного принятия решений и автоматического выполнения роботом различных функций как низкого, так и высокого уровня на основе заложенных алгоритмов и информации, получаемой с бортовых датчиков робота. На сегодняшний день самыми распространенными бортовыми датчиками робота являются камеры различных типов, что обусловлено их техническими возможностями и более низкой стоимостью относительно лидаров и других датчиков, предоставляющих визуальную информацию в виде цифровых изображений. Калибровка камер является необходимым процессом для извлечения точной информации из цифровых изображений. Данный процесс необходим для получения точного соответствия между трехмерным объектным пространством и пиксельным пространством изображения, для возможности последующего использования алгоритмов компьютерного зрения, комплексирования и обработки информации. Калибровка цифровых камер является неотъемлемой частью целого ряда практических задач машинного зрения: навигация мобильных робототехнических систем, медицина, реконструкция плотных и разреженных трехмерных карт окружения, видео-

наблюдение и визуальная инспекция, визуальная одновременная локализация и картографирование и др. Актуальность проблемы калибровки камер обусловлена наличием множества различных методов калибровки и калибровочных шаблонов. В большинстве случаев каждый метод калибровки использует определенный калибровочный шаблон. Каждое отдельное решение подходит лишь под особые условия – недостаток освещения, плохие погодные условия, наличие перекрывающих видимость сторонних объектов. Калибровка камер обычно ассоциируется с использованием специальных калибровочных шаблонов. Они позволяют достичь наиболее точных результатов за счет заранее известной геометрической структуры. В настоящее время процедура калибровки камер робототехнических систем проводится в лабораторных условиях с использованием классического метода «шахматной доски». Помимо него существует всего лишь несколько альтернативных подходов, которые находятся в зачаточном состоянии как в России, так и за рубежом. С другой стороны, исследования в области методов калибровки камеры продолжаются и появляются новые альтернативные варианты калибровки камер. Одно из новых направлений – это использование систем координатных меток в качестве эталонного объекта. Разнообразие параметров – размер калибровочного шаблона, размерность набора калибровочных данных, распределение расстояний от камеры до объектов на сцене и т.д. – создает объемную базу для экспериментального тестирования оптимальных параметров калибровки камер. В данной статье представлено исследование вопроса автоматической калибровки камеры с использованием систем координатных меток (СКМ), которые располагаются на поверхности робота. По результатам виртуальных экспериментов с СКМ в симуляционной среде Gazebo робототехнической операционной системы ROS были выбраны два разных типа СКМ, оптимальных относительно прочих типов меток, охваченных нашими предыдущими исследованиями, с точки зрения устойчивости СКМ к систематическому перекрытию поверхности метки и влияния размера метки на качество ее распознавания. Выбранные СКМ были протестированы с использованием бортовой камеры российского мобильного робота «Сервосила Инженер» в условиях закрытых помещений с целью оценки корреляции результатов в виртуальной и реальной средах.

Калибровка камеры; системы координатных меток; мобильный робот.

T.G. Tsoy

FIDUCIAL MARKERS EVALUATION USING ONBOARD CAMERA OF SERVOSILA ENGINEER MOBILE ROBOT IN INDOOR SETTINGS

Modern tasks of special areas of robotics, including search and rescue operations in urban areas, face a number of obstacles to mobile robotics, where the automatic performance of various functions by mobile robots remains a key task. One of the important requirements for the algorithms and software of the robot is the possibility of autonomous decision-making and automatic performance by the robot of various functions, both low and high levels based on the embedded algorithms and information received from the on-board sensors of the robot. To date, the most common on-board robot sensors are cameras of various types, due to their technical capabilities and lower cost relative to lidars and other sensors that provide visual information in the form of digital images. Camera calibration is a necessary process for extracting accurate information from digital images. This process is necessary to obtain an exact correspondence between the three-dimensional object space and the pixel space of the image, for the possibility of subsequent use of computer vision algorithms, aggregation, and information processing. Calibration of digital cameras is an integral part of a number of practical tasks of machine vision such as navigation of mobile robotic systems, medicine, reconstruction of dense and sparse three-dimensional maps of the environment, video surveillance and visual inspection, visual simultaneous localization and mapping, etc. The urgency of the problem of camera calibration is defined by the presence of many different methods of calibration and calibration templates. Each individual solution is suitable only for special conditions, e.g., lack of lighting, bad weather conditions, the presence of third-party objects blocking visibility, etc. In most cases, each calibration method uses a specific calibration pattern. Camera calibration is usually associated with the use of special calibration templates. They allow to achieve the most accurate results due to a previously known geometric structure. Currently, the procedure for camera calibrating of robotic systems is carried out in laboratory conditions using the classic “chessboard” method. In addition, there are only a few alternative approaches that are in their

infancy state both in Russia and abroad. On the other hand, research into camera calibration methods continues and new alternatives for camera calibration are emerging. One of the new directions is the use of fiducial marker systems as a reference object. A variety of parameters such as the size of the calibration template, the dimension of the calibration data set, the distribution of distances from the camera to objects on the stage, etc. creates a vast area for experimental testing of optimal camera calibration parameters. This paper presents a research of automatic camera calibration using fiducial marker systems (FMS), which are located on the surface of the robot. Based on the results of virtual experiments with FMS in the Gazebo simulation environment of the robotic operating system ROS, two different types of FMS were selected that are optimal relative to other types of FMS covered by our previous studies in terms of the resistance of FMS to systematic occlusion of the marker area and the effect of marker size on quality of its recognition. The selected FMS were tested using the onboard camera of the Russian mobile robot Servosila Engineer in indoor settings to assess the correlation of results in virtual and real environments.

Camera calibration; fiducial marker systems; mobile robot.

1. Введение. Наряду со стихийными бедствиями человечество сталкивается с техногенными катастрофами, которые могут возникнуть в результате террористических угроз, гражданских войн и других факторов, вызванных деятельностью человека, которая бросает вызовы для роботизированных поисково-спасательных операций, осуществляемых в городских условиях [1]. Роботизированная поисково-спасательная операция предполагает замену человека поисково-спасательным роботом из соображений повышения безопасности персонала и эффективности процессов. Как следствие, автономность робота становится жизненно важным элементом для обеспечения эффективной работы робота.

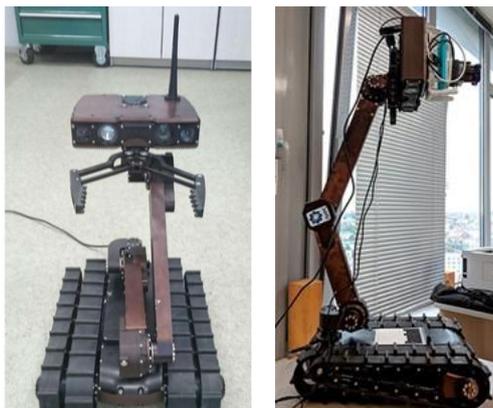
Городская среда после катастрофы представляет собой сложные условия работы для автономных роботов из-за непредсказуемости реальной миссии и возможных сценариев [2]. Поэтому за последнее десятилетие подавляющее большинство поисково-спасательных роботов использовалось в реальных полевых условиях в режиме телеуправления, то есть удаленного режима управления. Команда спасателей принимает решения, которые, среди прочего, основаны также и на данных, собранных при помощи бортовых датчиков роботов. На сегодняшний день самыми распространенными бортовыми датчиками робота являются камеры различных типов, что обусловлено их техническими возможностями и более низкой стоимостью относительно лидаров и других датчиков, предоставляющих визуальную информацию в виде цифровых изображений.

Камеры позволяют осуществлять исследования окружающей среды вокруг робота. При этом, чтобы собрать точные визуальные данные, требуется калибровка камеры после каждого аппаратно-программного изменения, которое может быть вызвано как внешними негативными воздействиями (например, падение робота или падение какого-либо объекта на корпус робота в месте расположения камеры, которые вызывают смещение или повреждение аппаратной составляющей) так и целенаправленно вмешательств, инициированного самим пользователем-оператором (например, перемещение датчика или замена линзы). Это стало нетривиальной задачей для исследователей, принимая во внимание тот факт, что обычно реальные поисково-спасательные операции проходят в условиях большого количества обломков конструкций зданий и располагавшихся внутри объектов, пыли, задымления, повышенной влажности и других условий, которые оказывают негативное влияние на дальность видимости предметов и окружающей среды, качество изображения и угол обзора камеры. Такие условия требуют периодического осуществления процедуры калибровки во время работ в реальных, полевых условиях в зоне осуществления поисково-спасательной операции. В то же время мы должны подчеркнуть, что использование точного промышленного оборудования для калибровки стоит дорого и его использование в полевых условиях крайне за-

труднительно, практически невозможно. Однако в большинстве случаев возможно применение методов компьютерного зрения для калибровки камеры с использованием только специального программного обеспечения, бортового компьютера и дополнительного бортового (навесного) оборудования робота.

Калибровка камеры поисково-спасательного робота требует от робота определенного уровня автономности, который мог бы позволить исключить помощь человека, чтобы избежать потенциальных дополнительных человеческих жертв в ходе поисково-спасательной операции. Кроме того, в полевых условиях, как правило, небольшой размер робота ограничивает использование досок большого размера для классической калибровки камеры (т. е. узор в виде шахматной доски), которые широко используются в лабораторных условиях, где обеспечиваются близкие к идеальным условия освещения и непосредственное участие человека в процессе калибровки.

В данной работе представлены экспериментальные исследования по сравнению систем координатных меток (СКМ) с учетом количества внешних критериев и валидации поведения двух разных типов СКМ в лабораторных условиях. Цель экспериментальных исследований состоит в сравнении уровня устойчивости различных СКМ к систематическому перекрытию поверхности метки и влияния размера метки, т. е. расстоянию от камеры до метки, на качество ее распознавания. Экспериментальная валидация выполнена с помощью бортовой камеры российского мобильного гусеничного робота «Сервосила Инженер» (рис. 1).



*Рис. 1. Слева – Мобильный робот «Сервосила Инженер».
Справа – Экспериментальная валидация на роботе «Сервосила Инженер»
в лабораторных условиях с использованием камеры и нанесенной на поверхность
робота координатной метки: эксперимент по оценке устойчивости метки
к перекрытию*

2 Обзор литературы. Tsai [3] и Zngang [4] представили успешные и точные методы калибровки камеры, ставшие популярными благодаря гибкому дизайну и калибровочному инвентарю в виде планарного шахматного узора, который можно легко распечатать на обычном принтере. Однако современные методы учитывают новые функции, включенные в базовый метод с использованием дизайна координатных меток с рисунком шахматной доски. Эти особенности были классифицированы в [5] и включают устойчивость к условиям освещения, устойчивость к ошибке первого рода (ложноположительное заключение) или ошибке второго рода (ложноотрицательное заключение), размер метки, устойчивость к перекрытиям и максимальное расстояние до метки.

Использование калибровочного шаблона шахматной доски – это метод надежной калибровки камеры только для хорошо контролируемых и близких к идеальным лабораторным условиям. Однако, шаблон не может быть обнаружен в случаях его перекрытия выше определенного допустимого предела или малого размера рисунка. Несмотря на то, что исследователи предлагали различные вариации с геометрией шаблона, например, круговые шаблоны [22], геометрия шахматной доски остается наилучшей для калибровки. По этой причине некоторые исследовательские группы создали свои улучшенные калибровочные доски, которые основаны именно на геометрии шахматной доски [6–9].

СКМ активно применяются при решении различных задачах для робототехнических систем, включая, например, такие задачи как локализация и навигация [10, 11], зрительно-моторные задачи [12, 13], обнаружение меток под водой [14] [15]. СКМ применялись в различных условиях окружающей среды, где обычно, благодаря алгоритмам распознавания, они использовались без участия человека. Последний фактор позволяет автоматизировать внешнюю калибровку камеры [16] и может потенциально использоваться для более сложного процесса внутренней калибровки камеры. Все же, это требует соответствующего исследования СКМ, чтобы определить лучшее семейство координатных меток для конкретной цели. В рамках сравнительного анализа необходимо провести большое количество экспериментов, чтобы получить статистически значимые результаты, позволяющие объективно оценить опциональность конкретного СКМ для конкретной задачи и с точки зрения конкретных критериев.

Долгосрочной целью проекта является автоматизация процессов калибровки камеры с использованием меток, расположенных на собственной поверхности робота. На первом этапе исследования была проведена серия пилотных экспериментов в ручном режиме [17] с использованием камер с разным разрешением, включая отдельные камеры и бортовые камеры российского антропоморфного робота AR-601M [23]. Поскольку каждое СКМ имеет разные сильные и слабые стороны, в начале проект был сосредоточен на экспериментах, которые учитывают устойчивость меток к перекрытию и вращению метки относительно осей системы координат. На этом первом этапе было выбрано три потенциальные СКМ: ARTag, AprilTag и CALTag. Выбор основывался на популярности СКМ среди исследователей в области компьютерного зрения и робототехники, а также наличие открытого исходного кода и удобства использования.

Был создан единый дизайн экспериментов для камер с разными параметрами: FaceCam 1000X и Basler acA640-90gc. Дизайн учитывал такие свойства СКМ, как устойчивость метки к систематическим перекрытиям, произвольным перекрытиям и вращению метки [18]. Эксперименты проводились в лабораторной среде с постоянными условиями освещения и идеальным фоном каждой координатной метки. После серии экспериментов были сделаны выводы, что ARTag и AprilTag обладают высокой чувствительностью к перекрытию границ метки, в то время как CALTag показал лучший результат – CALTag был успешно обнаружен даже при 50% области перекрытия другим объектом. В экспериментах произвольного перекрытия и вращения метки, все три СКМ были одинаково успешны.

Затем были разработаны эксперименты для тестирования меток в псевдополевой среде с использованием робота AR-601M [18]. Здесь под псевдополевой средой подразумевается, что, в то время как эксперименты проводились в тех же лабораторных помещениях, не уделялось особого внимания условиям освещения и фона каждой координатной метки, во время экспериментов метка намеренно перекрывалась различными предметами и изображениями. Эта же процедура экспериментов использовалась для проверки устойчивости метки к перекрытиям, но также

был добавлен дополнительный фактор изменения размера метки, чтобы проанализировать влияние обоих факторов на распознавание координатной метки. Анализ результатов продемонстрировал, что размер метки (или расстояние до камеры) играет критическую роль для успешной идентификации метки. СКМ AptilTag показала лучшие результаты, а показатели СКМ ARTag и CALTag были значительно ниже. Псевдополевые эксперименты в области автономной самокалибровки камеры роботом продемонстрировали прямую зависимость вероятности успеха распознавания от размера метки, который всегда должен быть максимизирован в доступных пределах размера места ее размещения на поверхности робота. Таким образом, можно сделать вывод, что необходимо сосредоточиться не только на экспериментах по перекрытию, но также и на размере метки.

Эксперименты, выполняемые в ручном режиме, имеют значительные и неизбежные недостатки, которые существенно снижают ценность получаемых экспериментальных результатов. Такие эксперименты трудно масштабировать для выполнения большого количества экспериментов, следуя такому же дизайну экспериментов с несколькими координатными метками, потому что положение и ориентация метки, условия света/тени и многие другие факторы должны быть точно проконтролированы и воспроизведены множество раз. Кроме того, реальный выбор оборудования зачастую ограничен и производит зашумленные сенсорные данные, препятствующие точному воспроизведению экспериментов ручного режима на практике.

Чтобы нивелировать отмеченные недостатки, была разработана виртуальная экспериментальная среда в робототехнической операционной системе ROS (англ. «Robot Operating System») с использованием симулятора Gazebo [19]. Виртуальная среда устраняет вариации в позиционировании камеры и метки и позволяет управлять виртуальными внешними условиями во время экспериментов. Данные виртуальные эксперименты были автоматизированы для получения данных о каждой метке для каждого типа СКМ. Анализ результатов виртуальных экспериментов показал, что метки ArUco 16h3 и ChiliTag оказались наименее чувствительны к уменьшению углового размера, поэтому эти СКМ были отобраны для дальнейшей проверки в лабораторных экспериментах с использованием бортовой камеры мобильного робота, которые представлены в данной статье.

3. Дизайн экспериментов. Все эксперименты были разработаны с использованием метода «один фактор за раз». (англ. «One-factor-at-a-time», OFAT). В подходе OFAT во время эксперимента исследуемый фактор, который представляет интерес, варьируется, в то время как все другие факторы, которые могут повлиять на результаты эксперимента, сохраняются постоянными [20]. Таким образом исключается влияние других факторов и оценивается влияние единственного фактора на результаты. Дизайн экспериментов построен по следующей схеме: процедура валидации, постоянные факторы, переменный фактор, процедура эксперимента, ожидаемые результаты.

Были предложены четыре конкретных идентификатора СКМ, которые ранее в различных экспериментах продемонстрировали более высокое качество распознавания по сравнению с другими СКМ. Далее была проведена валидация процедуры для выбранных меток, чтобы определить, какой идентификатор метки СКМ демонстрирует наилучшую производительность. Установка и дизайн экспериментов для каждого типа экспериментов описаны в следующих трех подразделах.

3.1. Аппаратное и программное обеспечение. Были проведены эксперименты с мобильным роботом «Сервосоила Инженера» (рис. 1), который имеет манипулятор с четырьмя степенями свободы (англ. «degrees of freedom», DoF) [21]. Четыре бортовые камеры расположены в голове робота, которая установлена над конечным звеном манипулятора. Захват изображения метки был выполнен бортовой камерой TWIGACam с разрешением 1280x720 при 50 кадрах в секунду. По результатам виртуальных экспериментов в симуляторе Gazebo, которые были описаны в разделе 2, четыре координатные метки были выбраны для дальнейших реальных

экспериментов: ArUco 16h3 с идентификаторами ID 53 и ID 198; Chilitag с идентификаторами ID 815 и ID 1015. Для обнаружения и распознавания меток мы использовали неформальные ROS-пакеты *ArUco1* и *ChiliTag2*.

3.2. Общие экспериментальные настройки. Для обоих типов экспериментов ряд внешних условий окружающей среды оставался неизменным. Постоянные факторы включали условия освещения, расстояние до метки, положение и ориентация метки, параметры камеры, ее положение и ориентация.

Условия освещения: равномерное искусственное освещение помещения с отсутствием избытка или недостатка освещения.

Расстояние до метки: постоянное расстояние от камеры до метки 0.7 метра.

Положение и ориентация метки: все метки крепились к плоской гладкой поверхности корпуса робота без наклона. Все метки располагались перед камерой робота. Метка крепилась к мобильной базе робота «Сервосила Инженер» между основных гусениц (рис. 1, справа).

Параметры камеры: следующие внутренние параметры камеры были зафиксированы в ходе экспериментов: разрешение камеры, модель дисторсии, масштабирование. Использована камера TWIGACam с разрешением 1280 x 720, модель бочкообразной дисторсии, без масштабирования, кадровая частота 50 кадров в секунду. Фокусное расстояние также оставалось постоянным соответственно выбору масштаба.

Положение и ориентация камеры: для всех экспериментов камера была расположена строго напротив метки. Процесс достижения необходимого положения и ориентации камер осуществлялся с учетом кинематической модели манипулятора.

Вариативные факторы и процедуры описаны в разделах 3.3. и 3.4.

Ожидаемые результаты. В каждом эксперименте необходимо получить процент успешных распознаваний каждой выбранной метки на каждом шаге. Результаты должны быть сведены в единую таблицу, что позволит сделать вывод об успешности СКМ с точки зрения критерия устойчивости к систематическим перекрытиям (раздел 3.3.) и критерия физического размера метки (раздел 3.4.).

3.3. Эксперимент 1 – Эксперименты с систематическими перекрытиями.

В этом разделе описывается дизайн эксперимента систематических перекрытий метки. Дополнительно к постоянным факторам, которые были подробно описаны в разделе 3.2, был добавлен фактор постоянного размера метки. Изменялся процент перекрытой (наложением другого объекта) области метки. Был использован определенный размер метки, который не может существенно повлиять на результаты эксперимента перекрытия метки. Оптимальный размер метки был выбран экспериментально; его верхний предел зависит от доступного места на поверхности базы мобильного робота, где потенциально может быть размещена метка. Мы использовали размеры меток размером от 1 см x 1 см до 12 см x 12 см.

Переменным фактором был процент перекрытия площади метки. Процент перекрытия увеличивался с постоянным шагом в 15 процентов и принимал значения 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%. На основании наших предыдущих виртуальных экспериментов, а также пилотных экспериментов в ручном режиме, мы предполагали, что перекрытие более 10–15% площади метки может оказать существенное негативное влияние на распознавание метки.

Экспериментальная процедура. Каждая метка была покрыта прямоугольным шаблоном из белой непрозрачной бумаги. Размер шаблона постепенно увеличивался начиная с нижней части метки к верхней, чтобы скрыть последовательно 0%, 15%, 30%, 45%, 60% и 75% площади метки соответственно, в т.ч. границы метки. В ходе эксперимента на каждом шаге камерой робота было получено десять изображений. После шести шагов с увеличением размера площади перекрытия эксперимент был запускался заново с новым идентификатором метки. Рис. 2 демонстрирует пример экспериментов систематических перекрытий.

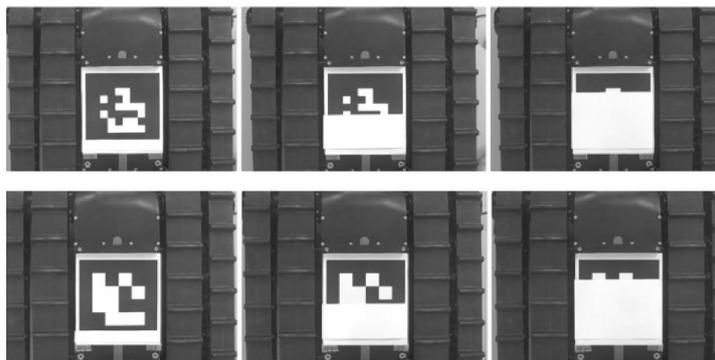


Рис. 2. Перекрытие координатных меток ChiliTag ID 815 (верхний ряд) и ArUco 16h3 ID 198 (нижний ряд) на 15%, 45%, 75% (слева направо)

Ожидаемые результаты. Ожидается получить конкретный процент успешных распознаваний каждой из выбранных меток на каждом этапе перекрытия. Результаты будут приведены в одной таблице, что позволит выбрать СКМ с наилучшими показателями устойчивости к систематическим перекрытиям.

3.4. Эксперимент 2 – Размер метки. В этом разделе описывается дизайн эксперимента с варьирующимся размером метки. Постоянные факторы, упомянутые в разделе 3.2, оставались фиксированными при изменении размера метки. Важно отметить, что метка всегда оставалась полностью видимой и без перекрытий внутреннего рисунка или границ.

Переменным фактором был размер квадратной метки. Его ширина и высота равнозначно уменьшались с постоянным шагом в 2 см (и на 1 см на последнем шаге), пока метка не достигала размера в 1 см x 1 см. Таким образом, сторона метки последовательно принимала значения 12, 10, 8, 6, 4, 2 и 1 см.

Экспериментальная валидация. Процедура началась с использования максимального размера метки; на каждом шаге размер метки был уменьшен на 2 см одновременно по ширине и высоте (1 см на последнем шаге, с 2 см до 1 см размера стороны метки). В ходе эксперимента на каждом шаге камера робота получала десять изображений. Когда был достигнут минимальный размер метки, эксперимент был перезапущен с новым идентификатором метки.

4. Экспериментальная валидация. В экспериментах типа Эксперимент 1 (раздел 3.3) мобильный робот верифицировал поведение координатных меток на устойчивость к перекрытию с сохранением условий окружающей среды и постоянного положения робота на протяжении всех экспериментов. Рисунок 1 (правое изображение) демонстрирует робота «Сервосила Инженер» во время экспериментов устойчивости к перекрытиям. Изображения каждой координатной метки были получены бортовой камерой робота TWIGACam, а человек вручную заменял идентификаторы СКМ и организовал соответствующее перекрытие для каждой метки.

В Эксперименте 2 (раздел 3.4) робот проверил координатные метки с разными размерами меток в одинаковых условиях окружающей среды и фиксированном положении робота, как оно было установлено для Эксперимента 1 (рис. 1, правое изображение).

5. Результаты. В табл. 1 представлены результаты Эксперимента 1. Все СКМ показали одинаково высокую чувствительность к перекрытию границ; ChiliTag ID1015 показал себя немного лучше других меток. Эти результаты показывают, что не все выбранные СКМ применимы для практических задач, если окклюзия метки превышает 15%.

Таблица 1

Процент успешного распознавания (%) при систематическом перекрытии СКМ ArUco 16h3 (ID 53 и 198) и Chilitag (ID 815 и 1015)

Идентификатор координатной метки	Процент перекрытия (%)					
	0	15	30	45	60	75
ArUco 16h3, ID53	100	0	0	0	0	0
ArUco 16h3, ID198	100	0	0	0	0	0
Chilitag, ID815	100	0	0	0	0	0
Chilitag, ID1015	100	100	0	0	0	0

Высокие показатели успешного распознавания были получены во время Эксперимента 2 (табл. 2). Из этого следует вывод о том, что все семейства координатных меток имели одинаковую устойчивость к изменению размера метки в диапазоне размера краев метки [12 см; 2 см] на зафиксированном расстоянии до камеры в 0.7 м при относительно высоком разрешении и качестве камеры. Следовательно СКМ должны быть выбраны случайным образом для задач с похожими условиями окружающей среды. Однако, если рассматривать качество распознавания наименьшего размера метки (1x1 см), то лучшие результаты продемонстрировали семейства Chilitag и ArUco 16h3, ID198.

Согласно полученным результатам экспериментов фиксированного размера метки и устойчивости к перекрытию СКМ Chilitag (табл. 1), процент успешного распознавания падает до 0%, начиная с 15 и 30 процентов перекрытия площади для Chilitag ID815 и ID1015 соответственно. Chilitag ID1015 показал лучшие результаты по сравнению с Chilitag ID815, поскольку он был распознан на перекрытии в 15%. Причина этой разницы заключается в особенности процесса идентификации метки, в основе создания которых лежит определенное установленное расстояние Хэмминга для разных меток, где значение расстояния Хэмминга равно количеству позиций, при котором соответствующие символы в двух равных последовательностях отличаются. Каждый идентификатор метки кодирует определенную двоичную последовательность, и если метка частично перекрывается, то часть закодированных данных теряется [18]. Интересно отметить, что результаты экспериментов были полностью бинарными: метки были идеально распознаны или не распознаны совсем. Этот факт может означать, что необходимо рассмотреть возможность повторения экспериментов в диапазоне [0%, 15%] для ArUco и Chilitag ID 815, а также в диапазоне [15 %, 30 %] для Chilitag ID 1015.

Что касается результатов эксперимента с разным размером метки (табл. 2), процент успешности распознавания показывает те же результаты для обоих представителей СКМ Chilitag, что составляет 100% для каждого размера метки, и очень близкие к ним результаты представителей СКМ ArUco.

Таблица 2

Процент успешного распознавания (%) в экспериментах по изменению размера метки

Идентификатор координатной метки	Размер квадратной метки (см)						
	12x12	10x10	8x8	6x6	4x4	2x2	1x1
ArUco 16h3, ID53	100	100	100	100	100	100	90
ArUco 16h3, ID198	100	100	100	100	100	100	100
Chilitag, ID815	100	100	100	100	100	100	100
Chilitag, ID1015	100	100	100	100	100	100	100

Заключение. Данная статья посвящена исследованию вопроса автоматической калибровки камеры с использованием систем координатных меток (СКМ), которые располагаются на поверхности робота. По результатам виртуальных экспериментов с СКМ в симуляционной среде Gazebo робототехнической операционной системы ROS были выбраны два разных типа СКМ (два идентификатора СКМ Chilitag и два идентификатора СКМ ArUco), оптимальных относительно прочих типов меток, охваченных нашими предыдущими исследованиями, с точки зрения устойчивости СКМ к систематическому перекрытию поверхности метки и влияния размера метки на качество ее распознавания. Был спроектирован дизайн экспериментов и выбранные СКМ были протестированы с использованием бортовой камеры российского мобильного робота «Сервосила Инженер» в условиях закрытых помещений с целью оценки корреляции результатов в виртуальной и реальной средах.

В экспериментах все координатные метки показали низкий результат по перекрытию области метки, т. к. при перекрытии 15% площади метки они не были распознаны. Chilitag ID1015 показал несколько лучший результат по сравнению с другими выбранными метками, поскольку он был распознан при 15% перекрытия, но не был распознан уже при 30 %. Эксперименты по выбору размера метки показали отличные результаты при распознавании координатных меток размеров от 12 x 12 см до 2 x 2 см. Процент распознавания меток размера 1 x 1 см был очень высоким для все меток-кандидатов, за исключением ArUco 16h3 ID53.

В рамках дальнейшего развития проекта планируется установить более точный процент устойчивости к перекрытию метки в пределах диапазона от 0 до 30 процентов при экспериментах систематического перекрытия, а также планируется проводить эксперименты с метками малого размера.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), номер проекта 20-38-90257.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alishev N., Lavrenov R., Hsia K. H., Su K. L., and Magid, E. Network failure detection and autonomous return algorithms for a crawler mobile robot navigation, *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. IEEE, 2018, pp. 169-174.
2. Safin R., Lavrenov R., & Martínez-García E. A. Evaluation of visual slam methods in usar applications using ros/gazebo simulation, *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2021, pp. 371-382.
3. Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, Vol. 3, pp. 323-344.
4. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, Vol. 22, pp. 1330-1334.
5. Fiala M. Comparing ARTag and ARToolkit Plus fiducial marker systems, *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*. IEEE, 2005, p. 6.
6. Rojtblerg P., and Kuijper A. Efficient pose selection for interactive camera calibration, *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 2018, pp. 31-36.
7. Romero-Ramirez F.J., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R. Speeded up detection of squared fiducial markers, *Image and Vision Computing*, 2018, Vol. 76, pp. 38-47.
8. Atcheson B., Heide F., Heidrich W. CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration, *VMV. Citeseer*, 2010, Vol. 10, pp. 41-48.
9. Hu D., DeTone D., and Malisiewicz T. Deep charuco: Dark charuco marker pose estimation, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 8436-8444.

10. Mantha B.R.K., and Garcia de Soto B. Designing a reliable fiducial marker network for autonomous indoor robot navigation, *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 2019, pp. 74-81.
11. Annusewicz A., and Zwierzchowski J. Marker detection algorithm for the navigation of a mobile robot, *2020 27th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES)*. IEEE, 2020, pp. 223-226.
12. Liu X., Madhusudanan H., Chen W., Li D., Ge J., Ru C., and Sun Y. Fast eye-in-hand 3-d scanner-robot calibration for low stitching errors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. IEEE, 2020, Vol. 68 (9), pp. 8422-8432.
13. Lee T.E., Tremblay J., To T., Cheng J., Mosier T., Kroemer O., and Birchfield S. Camera-to-robot pose estimation from a single image, *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020, pp. 9426-9432.
14. dos Santos Cesar D.B., Gaudig C., Fritsche M., dos Reis M.A., & Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments, *OCEANS 2015-Genova*. IEEE, 2015, pp. 1-6.
15. Westman E., and Kaess M. Underwater AprilTag SLAM and calibration for high precision robot localization. Tech. rep. Carnegie Mellon University, 2018.
16. Korthals T., Wolf D., Rudolph D., Hesse M., and Rückert U. Fiducial Marker based Extrinsic Camera Calibration for a Robot Benchmarking Platform, *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. IEEE, 2019, pp. 1-6.
17. Shabalina K., Sagitov A., Svinin M. and Magid E. Comparing Fiducial Markers Performance for a Task of a Humanoid Robot Self-calibration of Manipulators: A Pilot Experimental Study, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2018, pp. 249-258.
18. Shabalina K., Sagitov A., Sabirova L., Li H., Magid E. ARTag, AprilTag and CALTag fiducial systems comparison in a presence of partial rotation: Manual and automated approaches, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, Vol. 495, pp. 536-558.
19. Zakiev A., Shabalina K., Magid E. Pilot Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance, *International Conference on Artificial Life and Robotics. ICAROB*, 2019, Vol. 495, pp. 132-135.
20. Wahid Z. and Nadir N. Improvement of one factor at a time through design of experiments, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol. 21 (1), pp. 56-61.
21. Moskvina I., Lavrenov R., Magid E., Svinin M. Modelling a Crawler Robot Using Wheels as Pseudo-Tracks: Model Complexity vs Performance, *IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2020)*, 2020, pp. 235-239.
22. Safin R., Lavrenov R., Saha S. K., and Magid E. Experiments on mobile robot stereo vision system calibration under hardware imperfection, *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018. Vol. 161, pp. 03020.
23. Magid E., and Sagitov A. Towards robot fall detection and management for russian humanoid AR-601, *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*. Springer, Cham, 2017, pp. 200-209.

Статью рекомендовал к опубликованию профессор Мичинори Хатаяма.

Цой Татьяна Григорьевна – Казанский (приволжский) федеральный университет, Институт информационных технологий и интеллектуальных систем; e-mail: tt@it.kfu.ru; г. Казань, Россия; тел.: 88432065233 (доб. 35-22); Лаборатория интеллектуальных робототехнических систем; кафедра интеллектуальной робототехники; аспирант; ассистент.

Tsoy Tatyana Grigorievna – Kazan Federal University, Institute of Information Technology and Information Systems; e-mail: tt@it.kfu.ru; Kazan, Russia; phone: +78432065233 (ext. 35-22); Laboratory of intelligent robotic systems; the department of intelligent robotics; postgraduate student; research associate.

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/>.