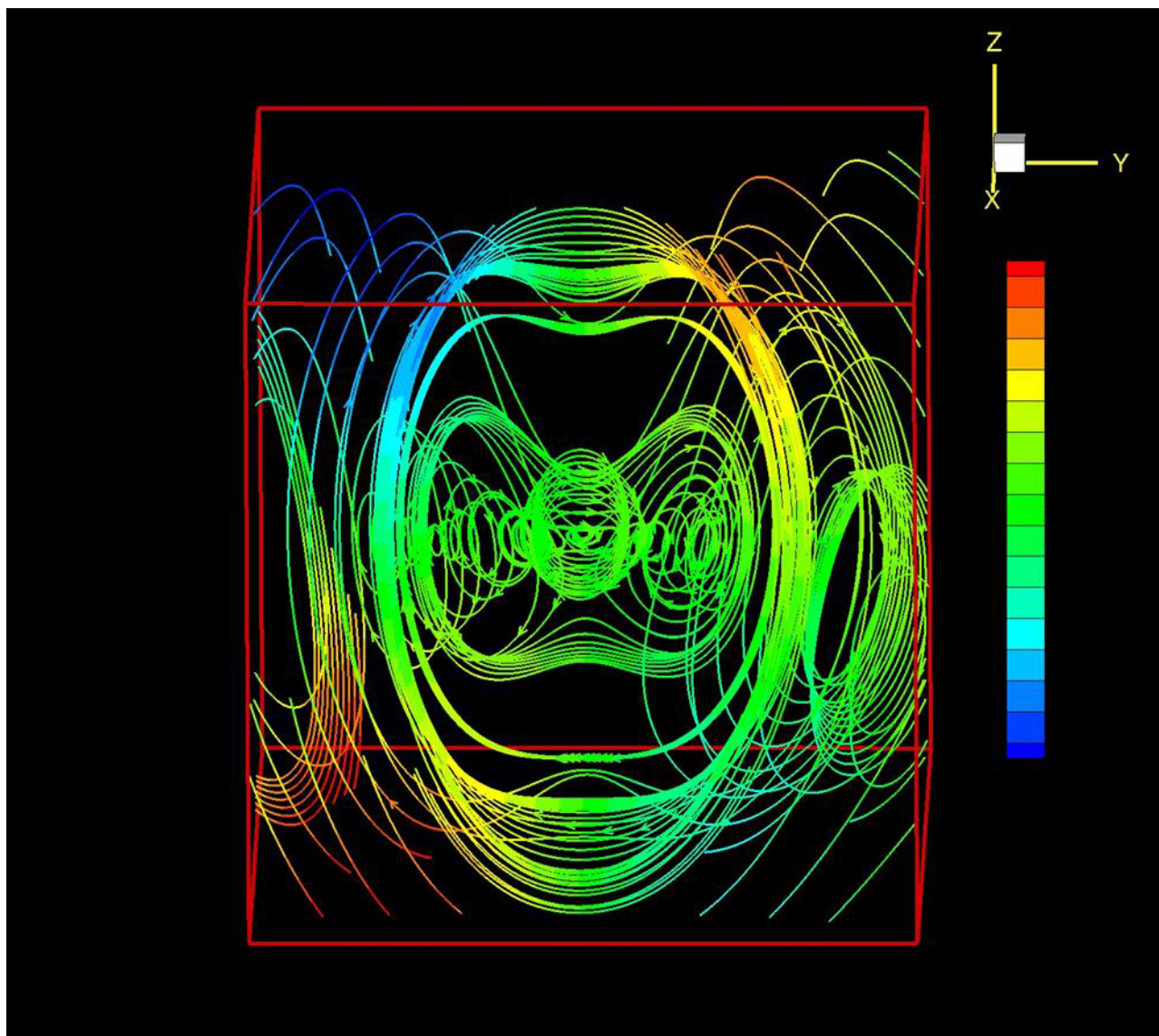




ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

PROCEEDINGS IN CYBERNETICS

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 25, № 1

**Сургут
2026**

Учредитель и издатель
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

Петрова М. А.

Редактор

Зелексон Л. А.

Верстка

Чорненко С. И.

Переводчики

Бенская М. О., Рудова А. Н.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года 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».

С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginskii, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering),
member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Dreys Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Petrova M. A.

Editor

Zelexson L. A.

Layout

Chornenkiy S. I.

Translators

Benskaya M. O., Rudova A. N.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. V.

Since March 29, 2017, the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;
- 2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate EI No. FS77-83015 of March 31, 2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia, 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Lenina pr., 1

Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Джин Хэ, Масленников А. Л., Щербак О. Ю.

О методе моделирования процесса захвата манипулятором объекта с применением
оптимизационной задачи и регулирования силы давления 6

Зорькин Д. Ю., Асанова Н. В.

Язык структурированных запросов для управления данными о транспортных средствах
и дорожно-транспортных происшествиях 18

Пирогов А. А., Хорошайлова М. В., Зобов П. В., Сёмка Э. В.

Методика проектирования двухтрансформаторного резонансного преобразователя
с оптимизацией индуктивностей для расширения диапазона мягкой коммутации 27

Попов О. Р., Крамаров С. О., Гребенюк Е. В.

Численные методы теории перколяции при анализе проявления связности в сетях знаний 39

Прудников С. И.

Управление портфелями патентных прав в организациях авиационной промышленности 49

Святов К. В., Щукарев И. А.

Визуализация онтологического графа с использованием библиотеки pydot Python 64

Симаков П. К.

Модификация метода TOPSIS 70

**Синицын Н. Н., Грибкова Ю. В., Сарычева И. А., Запатрина Н. В., Голицына Е. В.,
Разинкова О. С.**

Математическое моделирование теплообмена двухступенчатого вращающегося цилиндра 84

Брагинский М. Я., Тараканов Д. В.

Разработка модуля человеко-машинного интерфейса с функцией выявления утомления человека 93

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Беспалов М. С., Фролов К. А.

Обобщение кодов Уолша – Адамара 101

CONTENTS

ENGINEERING

Jin He, Maslennikov A. L., Scherbak O. Yu.

On process modeling method of manipulator object grasping based on optimization problem
 and pressure force control 6

Zorkin D. Yu., Asanova N. V.

Structured query language for data management of vehicles and road traffic accidents 18

Pirogov A. A., Khoroshailova M. V., Zobov P. V., Syomka E. V.

Designing dual-transformer resonant converter with inductance optimization
 to expand soft switching range 27

Popov O. R., Kramarov S. O., Grebenyuk E. V.

Numerical simulation of percolation theory in connectivity analysis of knowledge networks 39

Prudnikov S. I.

Patent portfolio management in aviation industry companies 49

Svyatov K. V., Shchukarev I. A.

Ontology graph visualization using pydot library in Python 64

Simakov P. K.

TOPSIS method modification 70

Sinit syn N. N., Gribkova Yu. V., Sarycheva I. A., Zapatrina N. V., Golitsyna E. V., Razinkova O. S.

Mathematical modeling of heat exchange in two-stage rotating cylinder 84

Braginskii M. Ya., Tarakanov D. V.

Developing module of human-machine interface for fatigue identification in people 93

PHYSICS AND MATHEMATICS

Bespalov M. S., Frolov K. A.

Generalized Walsh–Hadamard codes 101

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Научная статья

УДК 621.865.8:004.94

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-1>



**О методе моделирования процесса захвата манипулятором объекта с применением
оптимизационной задачи и регулирования силы давления**

Джин Хэ, Андрей Леонидович Масленников[✉], Ольга Юрьевна Щербак

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача моделирования захвата манипуляционным роботом объекта заданной формы. В качестве робота-манипулятора рассматривается система, близкая по своей кинематической конфигурации к кисти человека. Процесс моделирования условно делится на несколько этапов: позиционирование робота-манипулятора над объектом, позиционирование пальцев робота относительно геометрии объекта захвата, вычисление силы контакта, необходимой для захвата объекта, движение робота-манипулятора вместе с объектом. Первый и последний этапы выполняются путем изменения координат кинематического центра робота-манипулятора. Этап позиционирования пальцев сводится к обратной задаче кинематики, которая решается с использованием эволюционного метода оптимизации – генетического алгоритма. На этапе захвата определяется необходимая сила контакта, вычисление которой основано на решении задачи слежения за заданной установкой – заданной силой касания. Величина заданной силы касания выбирается из условия обеспечения необходимой силы трения между пальцами и объектом, которая обеспечит надежный захват. При этом динамика касания пальцев аппроксимируется динамикой второго порядка. Результаты моделирования демонстрируют принципиальную применимость предложенного подхода к задаче захвата объекта манипулятором.

Ключевые слова: биотехническая система, система управления, захват объекта, робот-манипулятор, задача обратной кинематики, генетический алгоритм

Для цитирования: Джин Хэ, Масленников А. Л., Щербак О. Ю. О методе моделирования процесса захвата манипулятором объекта с применением оптимизационной задачи и регулирования силы давления // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-1>.

Original article

**On process modeling method of manipulator object grasping based on optimization problem
and pressure force control**

Jin He, Andrey L. Maslennikov[✉], Olga Yu. Scherbak

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The work addresses the problem of simulating grasping an object of a specific shape by a robotic manipulator. The robot under consideration is similar to the human hand in terms of kinematic configuration. The modeling mechanism includes several stages: positioning the robotic hand over the object, placing the manipulator's fingers relative to the shape of the object grasped, calculating the contact force required to grasp the object, and moving the hand holding the object. The first and last phases are conducted by changing the coordinates of the robotic manipulator's kinematic center. The finger positioning stage is reduced to solving the inverse kinematics problem through an evolutionary optimization method, i.e. a genetic algorithm. The grasping phase defines the relevant contact force based on resolving the tracking issue for a set value, which is a predetermined touch force. The amount of the assigned touch force is reliant on the required friction force between fingers and the object that ensures a firm grasp. The authors approximate the finger dynamics to second-order dynamics. The simulation findings reveal the applicability of the proposed method to the problem of object grasping using a robotic manipulator.

Keywords: biotechnical system, control system, object grasping, robotic manipulator, inverse kinematics problem, genetic algorithm

For citation: Jin He, Maslennikov A. L., Scherbak O. Yu. On process modeling method of manipulator object grasping based on optimization problem and pressure force control. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-1>.

ВВЕДЕНИЕ

Многочленные роботизированные механизмы (манипуляторы) сегодня используются в различных областях [1], например в медицине в протезах [2], космической отрасли или промышленности [3]. Для качественной работы подобных систем необходима разработка эффективных и надежных систем управления, которые зачастую должны функционировать аналогично реальной физиологической системе, что необходимо учитывать при их проектировании. Как правило, это реализуется путем работы системы управления в нескольких режимах, соответствующих различным целевым задачам, например перемещению манипулятора, захвату объекта, переносу объекта и отпусканью объекта.

Одним из наиболее важных режимов является режим захвата, в котором осуществляется процесс управления путем приложения необходимых сил и моментов в точках контакта с поверхностью объекта [4]. Существуют различные методы управления захватом. Например, в работе [5] предложен метод захвата жестких объектов с использованием стратегии управления силой на основе обучения с подкреплением. В работе [6] задачу координации разделяют на два этапа: управление равнодействующей силой и внутренними силами. Задача захвата может быть сведена к решению билинейного матричного неравенства, как показано в работе [7]. В работе [8] предложен метод управления захватом, который полностью ограничивает движение объекта через геометрические ограничения, а в работе [9] учитывается проскальзывание при манипулировании жесткими объектами.

В данной работе рассматривается модель манипулятора, по своей кинематике близкой к кисти человека, для которой реализуется управление положением пальцев с помощью

пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов) по ошибкам углов и угловых скоростей. В процедуре моделирования для решения обратной задачи кинематики предлагается использовать генетический алгоритм. Предложенный механизм захвата учитывает силу сжатия пальцев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель системы. В работе рассматривается манипулятор, близкий по своим кинематическим связям к кисти человека и состоящий из пяти пальцев, четыре из которых являются трехзвенными, а один – двухзвенным. Полная математическая модель системы состоит из математических моделей всех пальцев, которые по своей сути являются одинаковыми. Поэтому рассмотрим математическую модель одного пальца, кинематическая схема которого представлена на рис. 1. Он состоит из нескольких звеньев различной массы m_1, m_2, m_3 и длины l_1, l_2, l_3 . В общем случае рассматривается движение по двум углам у каждого звена (фаланги).

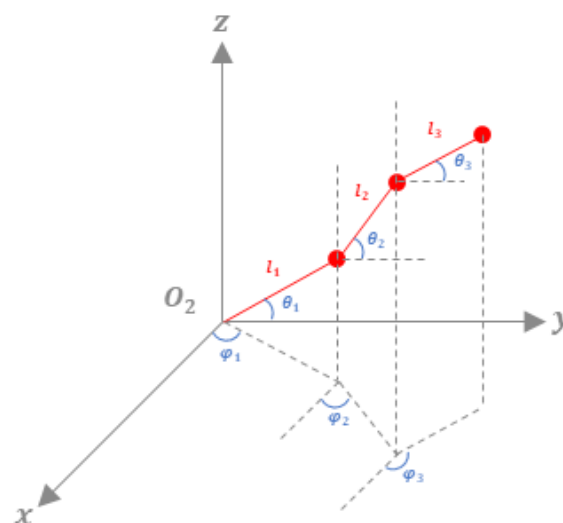


Рис. 1. Кинематическая схема трехзвенного манипулятора

Примечание: составлено авторами.

Математическое описание рассматриваемой системы можно получить с применением механики Лагранжа, согласно которой для каждого пальца, состоящего из трех звеньев, можно записать следующую систему дифференциальных уравнений Лагранжа 2-го рода [10–12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = U_{\theta_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} = U_{\varphi_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = U_{\theta_2} , \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_2} = U_{\varphi_2} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} = U_{\theta_3} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_3} = U_{\varphi_3} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, \theta_3, \varphi_3$ – углы поворота первого, второго и третьего звеньев в сферической системе координат соответственно; $\dot{\theta}_1, \dot{\varphi}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\varphi}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\varphi}_3$ – угловые скорости поворота первого, второго и третьего звеньев в сферической системе координат соответственно; $U_{\theta_1}, U_{\varphi_1}, U_{\theta_2}, U_{\varphi_2}, U_{\theta_3}, U_{\varphi_3}$ – управляющие воздействия по каждому углу; L – лагранжиан системы, $L = T - U$; T – кинетическая энергия звена; U – потенциальная энергия системы, которые определены следующим образом и зависят от описанных выше углов, угловых скоростей поворота, а также масс и длин звеньев:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m_1 (\dot{\theta}_1^2 l_1^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 \cos^2 \theta_1) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{\theta}_1^2 l_1^2 + \dot{\theta}_2^2 l_2^2 + \\ & + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 \cos^2 \theta_1 + \dot{\varphi}_2^2 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 l_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \\ & - 2\dot{\theta}_1 \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\varphi}_1 l_1 l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2) \\ & + \frac{1}{2} m_3 (\dot{\theta}_1^2 l_1^2 + \dot{\theta}_2^2 l_2^2 + \dot{\theta}_3^2 l_3^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 \cos^2 \theta_1 + \\ & + \dot{\varphi}_2^2 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\varphi}_3^2 l_3^2 \cos^2 \theta_3 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 l_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \\ & - 2\dot{\theta}_1 \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\varphi}_1 l_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \\ & - 2\dot{\theta}_1 \dot{\varphi}_3 l_1 l_3 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\varphi}_1 l_1 l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\theta}_3 \dot{\varphi}_1 l_1 l_3 \cos \theta_1 \sin \theta_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 l_1 l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - \\ & - 2\dot{\theta}_2 \dot{\varphi}_3 l_2 l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\theta}_3 \dot{\varphi}_2 l_2 l_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 l_1 l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3) \\ & U = (m_1 + m_2 + m_3) g l_1 \sin \theta_1 + \\ & + (m_2 + m_3) g l_2 \sin \theta_2 + m_3 g l_3 \sin \theta_3 \end{aligned} ; \quad (2)$$

Проведя необходимые преобразования, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику одного пальца:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\theta}_1 M_{11} + \ddot{\varphi}_1 M_{12} + \ddot{\theta}_2 M_{13} + \ddot{\varphi}_2 M_{14} + \ddot{\theta}_3 M_{15} + \ddot{\varphi}_3 M_{16} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{11} + \dot{\varphi}_1^2 N_{12} + \dot{\theta}_2^2 N_{13} + \dot{\varphi}_2^2 N_{14} + \dot{\theta}_3^2 N_{15} + \dot{\varphi}_3^2 N_{16} + \\ + C_1 + (m_1 + m_2 + m_3) g l_1 \cos \theta_1 = U_{\theta_1} \\ \ddot{\theta}_1 M_{21} + \ddot{\varphi}_1 M_{22} + \ddot{\theta}_2 M_{23} + \ddot{\varphi}_2 M_{24} + \ddot{\theta}_3 M_{25} + \ddot{\varphi}_3 M_{26} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{21} + \dot{\varphi}_1^2 N_{22} + \dot{\theta}_2^2 N_{23} + \dot{\varphi}_2^2 N_{24} + \dot{\theta}_3^2 N_{25} + \\ + \dot{\varphi}_3^2 N_{26} + C_2 = U_{\varphi_1} \\ \ddot{\theta}_1 M_{31} + \ddot{\varphi}_1 M_{32} + \ddot{\theta}_2 M_{33} + \ddot{\varphi}_2 M_{34} + \ddot{\theta}_3 M_{35} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{31} + \dot{\varphi}_1^2 N_{32} + \dot{\theta}_2^2 N_{33} + \dot{\varphi}_2^2 N_{34} + \\ + \dot{\theta}_3^2 N_{35} + \dot{\varphi}_3^2 N_{36} + C_3 + (m_2 + m_3) g l_2 \cos \theta_2 = U_{\theta_2} \\ \ddot{\theta}_1 M_{41} + \ddot{\varphi}_1 M_{42} + \ddot{\theta}_2 M_{43} + \ddot{\varphi}_2 M_{44} + \ddot{\theta}_3 M_{45} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{41} + \dot{\varphi}_1^2 N_{42} + \dot{\theta}_2^2 N_{43} + \dot{\varphi}_2^2 N_{44} + \\ + \dot{\theta}_3^2 N_{45} + \dot{\varphi}_3^2 N_{46} + C_4 = U_{\varphi_2} \\ \ddot{\theta}_1 M_{51} + \ddot{\varphi}_1 M_{52} + \ddot{\theta}_2 M_{53} + \ddot{\varphi}_2 M_{54} + \ddot{\theta}_3 M_{55} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{51} + \dot{\varphi}_1^2 N_{52} + \dot{\theta}_2^2 N_{53} + \dot{\varphi}_2^2 N_{54} + \\ + \dot{\theta}_3^2 N_{55} + \dot{\varphi}_3^2 N_{56} + C_5 + m_3 g l_3 \cos \theta_3 = U_{\theta_3} \\ \ddot{\theta}_1 M_{61} + \ddot{\varphi}_1 M_{62} + \ddot{\theta}_2 M_{63} + \ddot{\varphi}_2 M_{64} + \ddot{\theta}_3 M_{65} + \\ + \dot{\theta}_1^2 N_{61} + \dot{\varphi}_1^2 N_{62} + \dot{\theta}_2^2 N_{63} + \\ + \dot{\varphi}_2^2 N_{64} + \dot{\theta}_3^2 N_{65} + \dot{\varphi}_3^2 N_{66} + C_6 = U_{\varphi_3} \end{array} \right. , \quad (3)$$

где $\ddot{\theta}_1, \ddot{\phi}_1, \ddot{\theta}_2, \ddot{\phi}_2, \ddot{\theta}_3, \ddot{\phi}_3$ – угловые ускорения поворота первого, второго и третьего звеньев в сферической системе координат соответственно; M_{ij}, N_{ij} – сокращенные обозначения функций, зависящих от углов поворота, массы и длины звеньев, например:

$$M_{14} = -m_2 l_1 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) - m_3 l_1 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin(\phi_1 - \phi_2); \quad (4)$$

C_i – сокращенное обозначение функций, зависящих от углов поворота, угловой скорости, массы и длины звеньев; i – номер уравнения; j – порядковый номер обобщенной координаты.

В векторно-матричном виде математическая модель может быть записана таким образом:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = -\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{u}(t). \quad (5)$$

где $\mathbf{q}$ – вектор выбранных обобщенных координат; $\dot{\mathbf{q}}$ – соответствующий ему вектор производных; $\ddot{\mathbf{q}}$ – соответствующий ему вектор производных второго порядка, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= [\theta_1 \quad \phi_1 \quad \theta_2 \quad \phi_2 \quad \theta_3 \quad \phi_3]^T \\ \dot{\mathbf{q}} &= [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\phi}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\phi}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\phi}_3]^T; \\ \ddot{\mathbf{q}} &= [\ddot{\theta}_1 \quad \ddot{\phi}_1 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{\phi}_2 \quad \ddot{\theta}_3 \quad \ddot{\phi}_3]^T \end{aligned} \quad (6)$$

Подобный выбор обобщенных координат в виде углов поворота звеньев и их угловых скоростей является общепринятым для подобных систем [13, 14].

$\mathbf{M}$ – матрица сил инерции; $\mathbf{N}$ – матрица центробежных сил; $\mathbf{C}$ – матрица сил Кориолиса, составленные из ранее упомянутых сокращенных обозначений M_{ij}, N_{ij}, C_{ij} , которые в итоге имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{61} & \cdots & M_{66} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_{11} & \cdots & N_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{61} & \cdots & N_{66} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_6 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (7)$$

$\mathbf{G}$ – матрица сил гравитации, которая имеет вид:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2 + m_3)gl_1 \cos \theta_1 \\ 0 \\ (m_2 + m_3)gl_2 \cos \theta_2 \\ 0 \\ m_3 gl_3 \cos \theta_3 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

а $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий имеет вид:

$$\mathbf{u} = [U_{\theta_1} \quad U_{\phi_1} \quad U_{\theta_2} \quad U_{\phi_2} \quad U_{\theta_3} \quad U_{\phi_3}]^T. \quad (9)$$

Для численного моделирования уравнение (5) приводится к нормальной неявной форме Коши, представляющей собой матричное дифференциальное уравнение первого порядка следующего вида:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{M}(\mathbf{x}_q) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\dot{q}} \\ -\mathbf{N}(\mathbf{x}_q, \mathbf{x}_{\dot{q}})\mathbf{x}_{\dot{q}} - \mathbf{C}(\mathbf{x}_q, \mathbf{x}_{\dot{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{x}_q) + \mathbf{u} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица соответствующей размерности; $\mathbf{x}$ – вектор состояния:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_q \\ \mathbf{x}_{\dot{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \\ &= [\theta_1 \quad \phi_1 \quad \theta_2 \quad \phi_2 \quad \theta_3 \quad \phi_3 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\phi}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\phi}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\phi}_3]^T. \end{aligned} \quad (11)$$

Отметим, что для большого пальца, в котором рассматриваются всего два звена, математическая модель формируется аналогичным образом, но в ней исключаются последние два уравнения в системе, а первые четыре уравнения лишаются составляющих и зависимости от $\theta_3, \phi_3, \dot{\theta}_3, \dot{\phi}_3, \ddot{\theta}_3, \ddot{\phi}_3$. Этих же компонентов не будет и в векторе состояния.

Полная математическая модель системы, учитывающая динамику всех пальцев, получается путем объединения математических моделей каждого из пальцев со смещением базовой точки на некоторое фиксированное расстояние. Таким образом, каждый из четырех пальцев имеет 6 степеней свободы, а большой палец имеет 4 степени свободы, поэтому вся система имеет 28 степеней свободы. Отметим, что взаимосвязи между динамикой пальцев в работе не рассматриваются.

Для решения задачи регулирования в рассматриваемой системе введены ПИ-регуляторы как хорошо зарекомендовавшие себя способы построения регуляторов для подобного вида систем. Управление рассматриваемой системой осуществляется с применением ПИ-регуляторов по ошибкам каждого угла и угловой скорости, что в общем виде для каждого звена может быть записано как [11, 12, 15]:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= \mu_{\theta} + \mu_{\dot{\theta}} \\ v_{\varphi} &= \mu_{\varphi} + \mu_{\dot{\varphi}} \end{aligned} \quad (12)$$

где μ_{θ} , $\mu_{\dot{\theta}}$, μ_{φ} , $\mu_{\dot{\varphi}}$ – соответствующие ПИ-законы регулирования по углам и угловым скоростям, которые формируются по ошибкам углов и угловых скоростей с соответствующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} \mu_{\theta} &= k_{p\theta} \theta_{err} + k_{i\theta} \theta_{err_int} \\ \mu_{\varphi} &= k_{p\varphi} \varphi_{err} + k_{i\varphi} \varphi_{err_int} \\ \mu_{\dot{\theta}} &= k_{p\dot{\theta}} \dot{\theta}_{err} + k_{i\dot{\theta}} \dot{\theta}_{err_int} \\ \mu_{\dot{\varphi}} &= k_{p\dot{\varphi}} \dot{\varphi}_{err} + k_{i\dot{\varphi}} \dot{\varphi}_{err_int} \end{aligned} \quad (13)$$

где θ_{err} , φ_{err} , θ_{err_int} , φ_{err_int} , $\dot{\theta}_{err}$, $\dot{\varphi}_{err}$, $\dot{\theta}_{err_int}$, $\dot{\varphi}_{err_int}$ – ошибки и интегралы ошибок по углам и угловым скоростям; $k_{p\theta}$, $k_{p\varphi}$, $k_{p\dot{\theta}}$, $k_{p\dot{\varphi}}$, $k_{i\theta}$, $k_{i\varphi}$, $k_{i\dot{\theta}}$, $k_{i\dot{\varphi}}$ – коэффициенты ПИ-регуляторов.

Моделирование движения кисти. Перемещение кисти осуществляется с постоянной скоростью и реализовано через смещение глобальных координат.

Алгоритм решения задачи переноса объекта. Предполагается, что объект, подлежащий захвату, представляет собой жесткий куб заданного размера, форма и размеры которого не изменяются под действием сил. Полный процесс задачи переноса объекта в заданную точку можно разделить на четыре этапа:

- 1) перемещение манипулятора из начальной точки в точку над объектом (рис. 2);
- 2) постепенное приближение пальцев к объекту без контакта (рис. 3);
- 3) начало контакта пальцев с объектом и постепенное увеличение силы до достижения значения, необходимого для стабильного захвата (рис. 4);

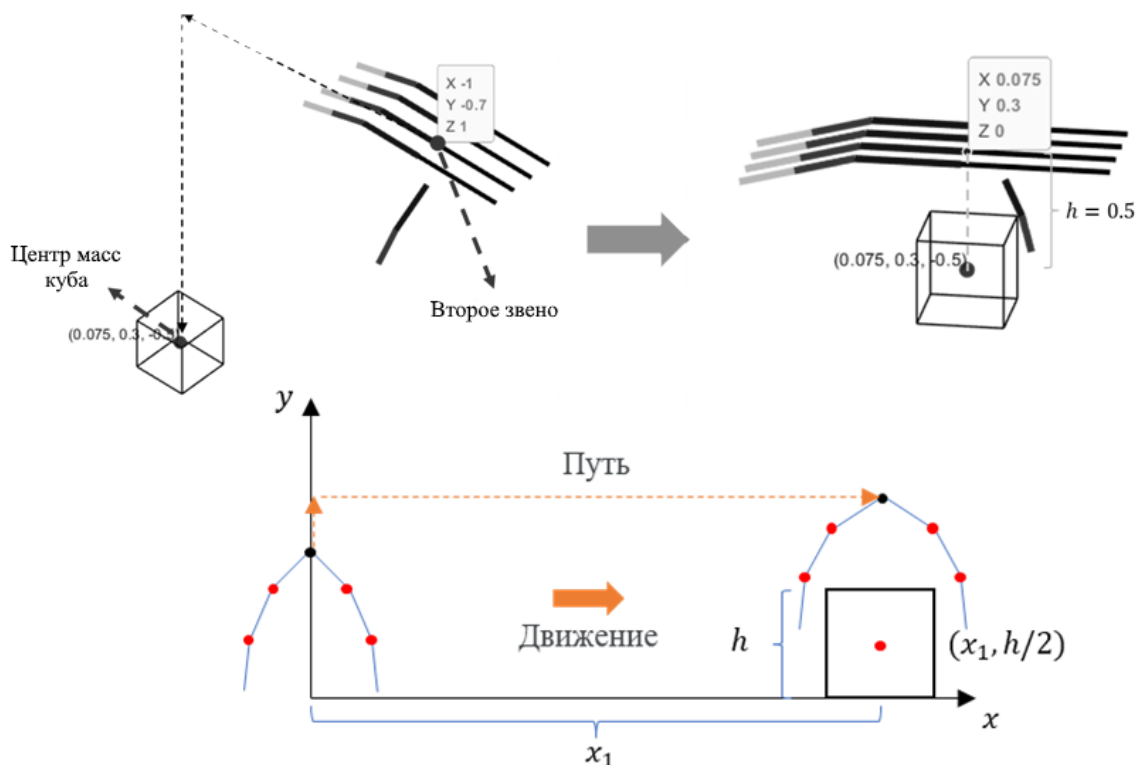


Рис. 2. Упрощенная схема первого этапа процесса захвата

Примечание: составлено авторами.

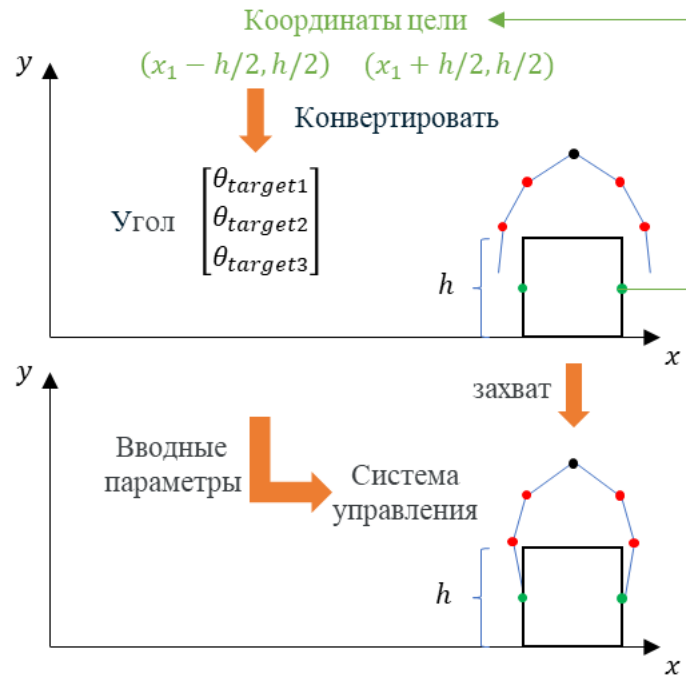


Рис. 3. Упрощенная схема использования оптимизационного алгоритма для определения целевых углов суставов

Примечание: составлено авторами.

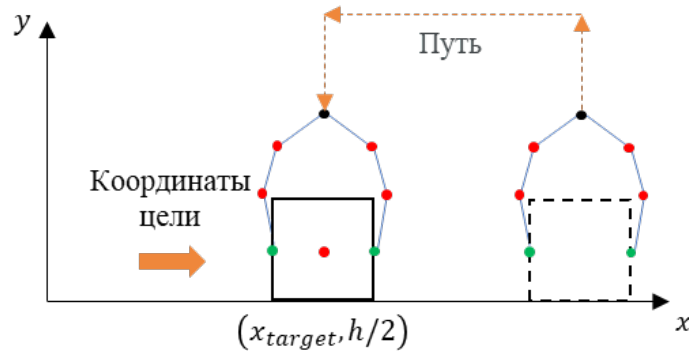


Рис. 4. Упрощенная схема четвертого этапа процесса захвата

Примечание: составлено авторами.

4) перемещение объекта в заданную точку.

На первом этапе процесса захвата манипулятор поднимается вверх, с центром во втором звене среднего пальца, и перемещается в известное положение над центром масс заданного объекта. Затем манипулятор медленно опускается до высоты в 5 см от объекта (см. рис. 2). Аналогичный подход применяется и для четвертого этапа переноса объекта, но с подъемом манипулятора уже вместе с объектом.

Позиционирование пальцев на захватываемом объекте. На этапе захвата объекта сначала решается задача обратной кинемати-

ки. Она обычно связана с решением системы нелинейных уравнений, которые трудно решить аналитически. В качестве численного подхода предлагается использовать численный метод оптимизации на примере генетического алгоритма. Положение конца пальца манипулятора в трехмерном пространстве (x , y , z) может быть выражено через углы суставов следующим образом (см. рис. 2):

$$\begin{cases} x_3 = l_1 \cos \theta_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \theta_3 \cos \varphi_3 \\ y_3 = l_1 \cos \theta_1 \sin \varphi_1 + l_2 \cos \theta_2 \sin \varphi_2 + l_3 \cos \theta_3 \sin \varphi_3 \\ z_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (14)$$

Эти уравнения описывают переход от угловых положений звеньев манипулятора к положению конца пальца в декартовой системе координат. Задача обратной кинематики состоит в том, чтобы при заданном целевом положении $(x_{\text{зад}}, y_{\text{зад}}, z_{\text{зад}})$ найти углы $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, при которых выполняются указанные уравнения. Для формирования задачи оптимизации к решению обратной задачи кинематики сформируем вектор ошибки положения конца пальца последнего звена пальца и евклидову норму ошибки в виде:

$$\|e(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\|_2 = \sqrt{(x - x_{\text{зад}})^2 + (y - y_{\text{зад}})^2 + (z - z_{\text{зад}})^2}. \quad (15)$$

Тогда постановка оптимизационной задачи для каждого пальца в отдельности (так как предполагается отсутствие взаимосвязей между ними) может быть сформулирована как:

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} = \arg \min_{\theta_i \in [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}]} \|e(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\|_2. \quad (16)$$

Отметим, что заданные координаты концов пальцев для каждого пальца разные.

Моделирование силы касания. Предполагаем, что материал концов пальцев является мягким и подвержен деформации при контакте с объектом, что схоже с системой «масса–пружина–демпфер», математическая модель которой используется в качестве модели контакта, а кинематическая схема которой представлена на рис. 5, где введены следующие обозначения: m – масса системы; b – коэффициент вязкого трения; k – коэффициент упругости пружины; q – смещение системы; $F_{\text{конт}}$ – сила контакта пальца с объектом.

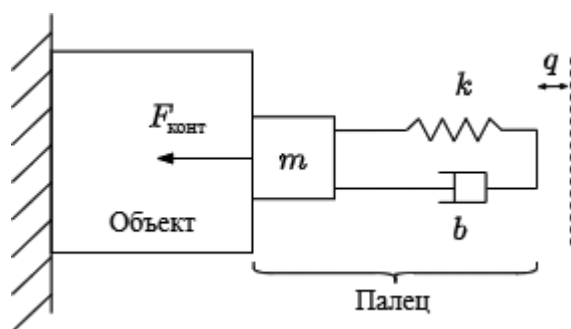


Рис. 5. Контакт и применение силы
 Примечание: составлено авторами.

Необходимо рассмотреть три случая: нет контакта с объектом; критическая точка при возникновении контакта, но $F_{\text{конт}} = 0$; контакт с объектом при $F_{\text{конт}} > 0$.

Модель контакта конца каждого пальца можно описать следующим образом:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = F_{\text{конт}} = u. \quad (17)$$

Тогда уравнение состояния системы в нормальной форме Коши записывается как:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{b}{m}x_2 - \frac{k}{m}x_1 + \frac{u}{m} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Система регулирования строится с обратной связью по силе и использованием ПИ-регулятора. Управление u рассчитывается на основе текущей ошибки e_F , которая определяется как разница между заданным значением силы $F_{\text{зад}}$ и фактической силой $F_{\text{конт}}$:

$$e_F = F_{\text{зад}} - F_{\text{конт}} \quad (19)$$

и соответствующей величиной интегральной ошибки $e_{F_{\text{int}}}$. Закон ПИ-регулирования силы записывается следующим образом:

$$u = k_{pF}e_F + k_{iF}e_{F_{\text{int}}}, \quad (20)$$

где k_{pF}, k_{iF} – коэффициенты регулятора. Таким образом, формирование силы контакта $F_{\text{конт}}$ реализуется системой слежения за заданной установкой в виде $F_{\text{зад}}$, которая задается в виде константы, предварительно рассчитанной на основе конфигурации захвата и предположительно необходимой силы трения между пальцами и объектом, обеспечивающей надежный захват. Описанная модель контакта используется для всех пальцев манипулятора, в общем случае, с различными заданными силами контакта и коэффициентами регулятора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для апробации теоретических положений был проведен вычислительный эксперимент в среде научных вычислений MathWorks Matlab, в рамках которого использовались параметры манипулятора и объекта захвата, представленные в таблице.

Таблица

Параметры манипулятора и объекта захвата			
Параметр	Значение	Угол	Диапазон движения
Большой палец			
l_1 , м	0,037	θ_1 , град	0–85
l_2 , м	0,03	θ_2 , град	0–60
m_1 , кг	0,043		
m_2 , кг	0,025		
Четыре пальца			
l_1 , м	0,043	θ_1 , град	0–60
l_2 , м	0,025	θ_2 , град	0–110
l_3 , м	0,023	θ_3 , град	0–95
m_1 , кг	0,043		
m_2 , кг	0,025		
m_3 , кг	0,023		
Кубический объект			
l , м	0,035		
m , кг	1	–	–
k	1		

Примечание: составлено на основании источника [16].

Начальные условия для каждого из пальцев были приняты следующими:

$$\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (21)$$

А целевые значения для захвата – следующими:

$$\mathbf{x}_{\text{зад}} = \left[-\frac{\pi}{15} \ 0 \ -\frac{7\pi}{10} \ 0 \ -\frac{11\pi}{12} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T. \quad (22)$$

В качестве примера работы описанной системы регулирования углового положения паль-

цев на рис. 6 показаны зависимости углов и угловых скоростей каждого звена для первого пальца. Система способна точно реагировать на заданную установку, плавно перемещаясь из начального положения в заданное.

Результаты второго этапа захвата, на котором вычисляются углы, необходимые для захвата объекта, представлены на рис. 7.

На рис. 8 представлены различные жесты, требующиеся для захвата объектов различного объема и массы.

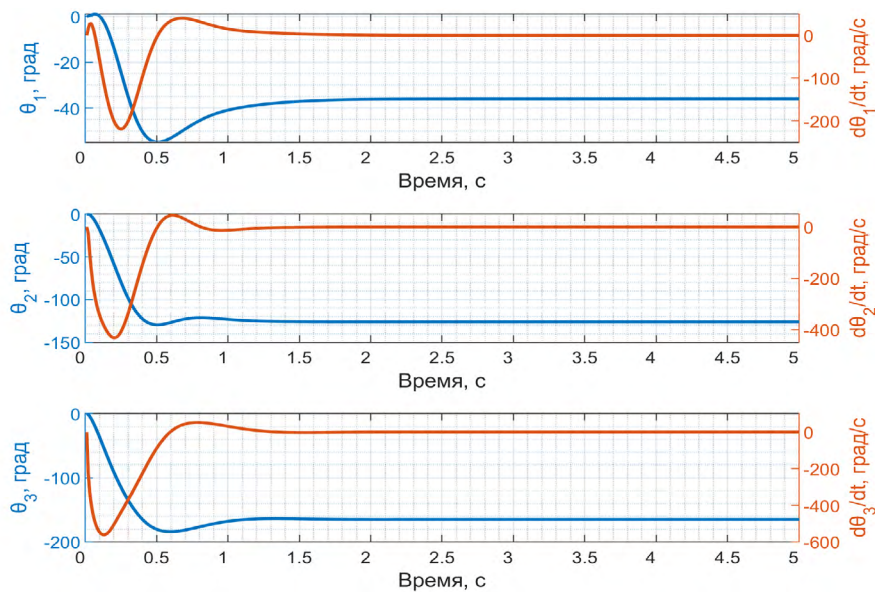


Рис. 6. Изменение углов суставов и угловых скоростей во времени

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

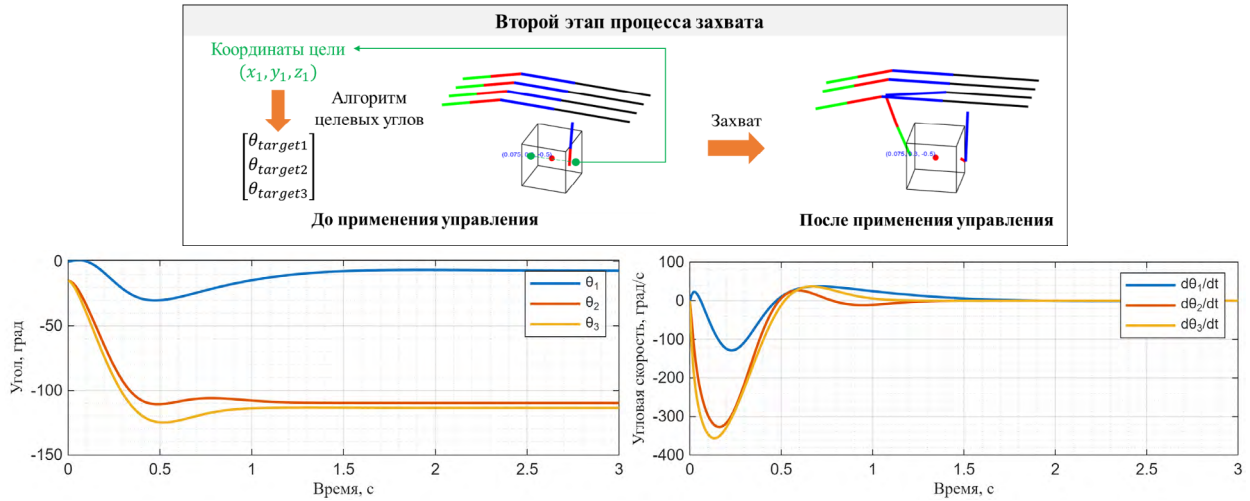


Рис. 7. Решение задачи обратной кинематики и его результаты
 Примечание: составлено авторами.

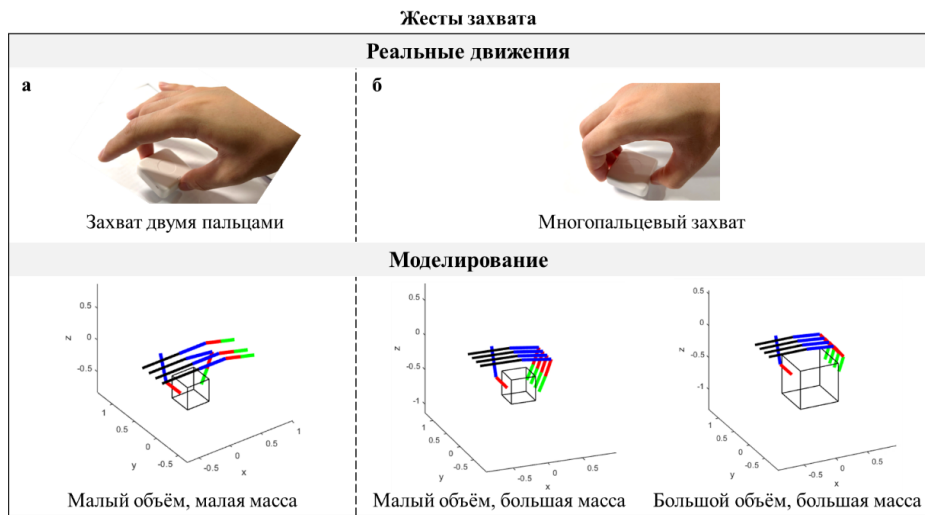


Рис. 8. Различные стратегии захвата
 Примечание: составлено авторами.

Результаты третьего этапа, в котором требуется достижение заданной для контакта силы, рассчитанной априори, представлены на рис. 9.

Полный процесс захвата показан на рис. 10.

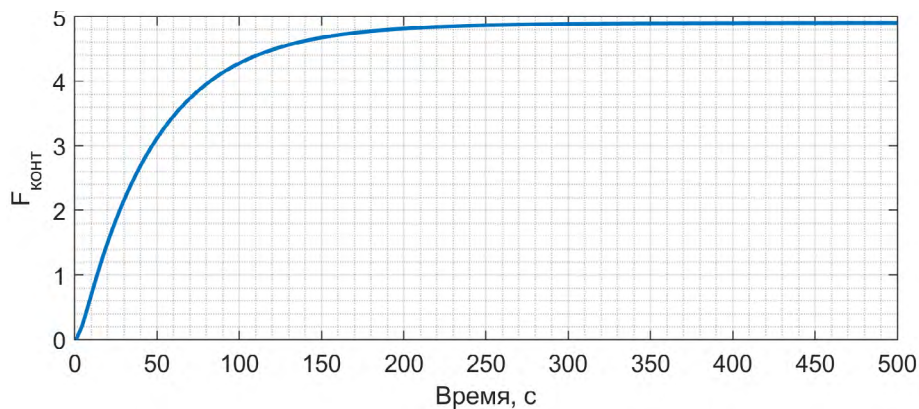
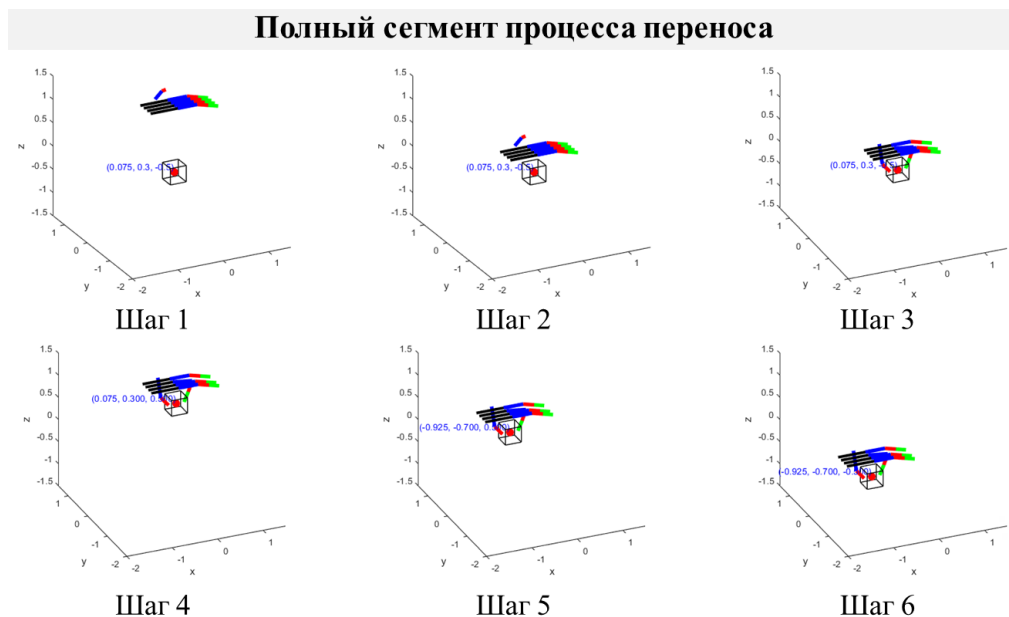


Рис. 9. Результаты выходных данных системы регулирования с обратной связью по силе
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в ходе исследования.

**Рис. 10. Демонстрация полного процесса захвата***Примечание: составлено авторами.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривалась задача захвата объекта манипулятором. Был рассмотрен процесс захвата, состоящий из четырех этапов. Получены математические модели динамики манипулятора и контакта пальца с объектом,

которые были объединены в систему. Задача обратной кинематики решалась с использованием генетического алгоритма. Результаты моделирования показали, что предложенный подход к задаче захвата объекта манипулятором обеспечивает стабильный захват.

Список источников

1. Масленников А. Л., Щербак О. Ю. Перспективы развития биотехнических систем, создаваемых по образу двигательной системы человека // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. 2019. № 8. С. 49–57. <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2019-8-49-57>.
2. Toedtheide A., Fortunić E. P., Kühn J. et al. A wearable force-sensitive and body-aware exoprosthesis for a transhumeral prosthesis socket // *IEEE Transactions on Robotics*. 2023. Vol. 39, no. 3. P. 2203–2223. <https://doi.org/10.1109/tro.2023.3251947>.
3. Zhang J., Zhao H., Chen K. et al. Dexterous hand towards intelligent manufacturing: A review of technologies, trends, and potential applications // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2025. Vol. 95. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103021>.
4. Newbury R., Gu M., Chumbley L. et al. Deep learning approaches to grasp synthesis: A review // *IEEE Transactions on Robotics*. 2023. Vol. 39, no. 5. P. 3994–4015.
5. Beltran-Hernandez C. C., Petit D., Ramirez-Alpizar I. G. et al. Learning force control for contact-rich manipulation tasks with rigid position-controlled robots // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5, no. 4. P. 5709–5716. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3010739>.

References

1. Maslennikov A. L., Scherbak O. Yu. Prospects for the development of biotechnical systems designed based on the human motor system. *Journal of Advanced Research in Natural Science*. 2019;(8):49–57. <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2019-8-49-57>. (In Russ.).
2. Toedtheide A., Fortunić E. P., Kühn J. et al. A wearable force-sensitive and body-aware exoprosthesis for a transhumeral prosthesis socket. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023;39(3):2203–2223. <https://doi.org/10.1109/tro.2023.3251947>.
3. Zhang J., Zhao H., Chen K. et al. Dexterous hand towards intelligent manufacturing: A review of technologies, trends, and potential applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2025;95. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103021>.
4. Newbury R., Gu M., Chumbley L. et al. Deep learning approaches to grasp synthesis: A review. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023;39(5):3994–4015.
5. Beltran-Hernandez C. C., Petit D., Ramirez-Alpizar I. G. et al. Learning force control for contact-rich manipulation tasks with rigid position-controlled robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(4):5709–5716. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3010739>.

6. Nakamura Y., Nagai K., Yoshikawa T. Dynamics and stability in coordination of multiple robotic mechanisms // *The International Journal of Robotics Research*. 1989. Vol. 8, no. 2. P. 44–61. <https://doi.org/10.1177/027836498900800204>.
7. Dai H., Majumdar A., Tedrake R. Synthesis and optimization of force closure grasps via sequential semidefinite programming // *Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics* / Bicchi A., Burgard W., eds. Cham : Springer, 2018. Vol. 2. P. 285–305. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51532-8_18.
8. Ozawa R., Tahara K. Grasp and dexterous manipulation of multi-fingered robotic hands: A review from a control view point // *Advanced Robotics*. 2017. Vol. 31, no. 19–20. P. 1030–1050. <https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1365011>.
9. Fakhari A., Keshmiri M., Kao I. et al. Slippage control in soft finger grasping and manipulation // *Advanced Robotics*. 2016. Vol. 30, no. 2. P. 97–108. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1105149>.
10. Заика В. В., Масленников А. Л. Математическое моделирование однозвенного сферического маятника в сферической системе координат // *Политехнический молодежный журнал*. 2019. № 9 (38). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-522>.
11. Заика В. В., Масленников А. Л. Синтез системы регулирования сферического маятника методом компенсации нелинейностей // *Фундаментальные основы механики*. 2019. № 4. С. 74–79. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-74-79>.
12. Заика В. В., Масленников А. Л. Цифровая система управления сферическим маятником // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2020. № 21. С. 82–88. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-82-88>.
13. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot modeling and control, second edition // *IEEE Control Systems*. 2022. Vol. 42, no. 1. P. 126–128. <https://doi.org/10.1109/MCS.2021.3122271>.
14. Dong S., Yuan Z., Zhang F. A simplified method for dynamic equation of robot in generalized coordinate system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1345, no. 4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1345/4/042077>.
15. Заика В. В., Масленников А. Л. Цифровая система управления трехзвенного сферического маятника с координированным управлением // *Автоматизация. Современные технологии*. 2022. Т. 76, № 12. С. 566–572. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2022-76-12-566-572>.
16. Gracia-Ibáñez V., Vergara M., Sancho-Bru J. L. et al. Functional range of motion of the hand joints in activities of the International Classification of Functioning, Disability and Health // *Journal of Hand Therapy*. 2017. Vol. 30, no. 3. P. 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2016.08.001>.
6. Nakamura Y., Nagai K., Yoshikawa T. Dynamics and stability in coordination of multiple robotic mechanisms // *The International Journal of Robotics Research*. 1989. Vol. 8, no. 2. P. 44–61. <https://doi.org/10.1177/027836498900800204>.
7. Dai H., Majumdar A., Tedrake R. Synthesis and optimization of force closure grasps via sequential semidefinite programming. In: Bicchi A., Burgard W., eds. *Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics*. Cham: Springer; 2018. Vol. 2. p. 285–305. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51532-8_18.
8. Ozawa R., Tahara K. Grasp and dexterous manipulation of multi-fingered robotic hands: A review from a control view point. *Advanced Robotics*. 2017;31(19–20):1030–1050. <https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1365011>.
9. Fakhari A., Keshmiri M., Kao I. et al. Slippage control in soft finger grasping and manipulation. *Advanced Robotics*. 2016;30(2):97–108. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1105149>.
10. Zaika V. V., Maslennikov A. L. Single-joint spherical pendulum mathematical modeling in spherical coordinate system. *Politechnical Student Journal*. 2019;(9). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-522>. (In Russ.).
11. Zaika V. V., Maslennikov A. L. Spherical pendulum control synthesis via nonlinearities compensation. *Fundamentalnye osnovy mekhaniki*. 2019;(4):74–79. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-74-79>. (In Russ.).
12. Zaika V. V., Maslennikov A. L. Digital control of the spherical pendulum. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2020;(21):82–88. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-82-88>. (In Russ.).
13. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot modeling and control, second edition. *IEEE Control Systems*. 2022;42(1):126–128. <https://doi.org/10.1109/MCS.2021.3122271>.
14. Dong S., Yuan Z., Zhang F. A simplified method for dynamic equation of robot in generalized coordinate system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1345(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1345/4/042077>.
15. Zaika V. V., Maslennikov A. L. Digital control system of a three-link spherical pendulum with coordinated control. *Automation. Modern Technologies*. 2022;76(12):566–572. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2022-76-12-566-572>. (In Russ.).
16. Gracia-Ibáñez V., Vergara M., Sancho-Bru J. L. et al. Functional range of motion of the hand joints in activities of the International Classification of Functioning, Disability and Health. *Journal of Hand Therapy*. 2017;30(3):337–347. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2016.08.001>.

Информация об авторах

Джин Хэ – магистр;

<https://orcid.org/0009-0009-1534-8484>,
dzhinkh@student.bmstu.ru

А. Л. Масленников – старший преподаватель;

<https://orcid.org/0000-0001-9061-4193>,
amas@bmstu.ru✉

О. Ю. Щербак – ассистент;

<https://orcid.org/0000-0002-1826-910X>,
scherbak.olga.j@bmstu.ru

About the authors

Jin He – Master's Degree Student;

<https://orcid.org/0009-0009-1534-8484>,
dzhinkh@student.bmstu.ru

A. L. Maslennikov – Senior Lecturer;

<https://orcid.org/0000-0001-9061-4193>,
amas@bmstu.ru✉

O. Yu. Scherbak – Assistant;

<https://orcid.org/0000-0002-1826-910X>,
scherbak.olga.j@bmstu.ru

Научная статья

УДК 656.13:004.65

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-2>



Язык структурированных запросов для управления данными о транспортных средствах и дорожно-транспортных происшествиях

Дмитрий Юрьевич Зорькин[✉], Наталья Васильевна Асанова

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Предметом исследования является применение языка структурированных запросов для систематизации сведений о транспортных средствах, их владельцах и дорожно-транспортных происшествиях в интегрированной информационной среде. Цель работы заключается в разработке и верификации методики проектирования реляционной базы данных, обеспечивающей гарантированную целостность учета и автоматизированный расчет страховых выплат с финансовой точностью. В статье реализована нормализованная структура таблиц посредством DDL-скриптов, включающих ограничения на соответствие данных ГОСТам (на примере регистрационных знаков). Продемонстрирована реализация ключевой бизнес-логики через SQL-запрос, который использует условную логику и агрегирование для корректного учета лимитов ответственности по полису ОСАГО. Проведено сравнение реляционного подхода с нереляционными (NoSQL) и масштабируемыми реляционными (NewSQL) решениями. Сделан вывод о том, что классические SQL-системы являются оптимальными для задач учета, требующих строгой ACID-согласованности и прозрачности вычислений.

Ключевые слова: SQL, реляционная база данных, ДТП, страховые выплаты, целостность данных, DDL, NoSQL

Для цитирования: Зорькин Д. Ю., Асанова Н. В. Язык структурированных запросов для управления данными о транспортных средствах и дорожно-транспортных происшествиях // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 18–26. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-2>.

Original article

Structured query language for data management of vehicles and road traffic accidents

Dmitry Yu. Zorkin[✉], Nataliya V. Asanova

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. The article studies implementation of the structured query language (SQL) in systematizing data on vehicles, their owners, and road traffic accidents (RTAs) within an integrated information environment. The paper aims to develop and validate a method for designing a relational database that ensures accounting integrity and financially precise automated calculation of insurance payments. The work structures table with vehicle registration plates data using DDL scripts, which include constraints for data compliance with state standards. The authors perform the key business logic with an SQL query that applies conditional logic and aggregation for the accurate accounting of liability limits under the compulsory motor third party liability insurance. The study contains a comparison of the relational approach with non-relational (NoSQL) and scalable relational (NewSQL) methods. It is concluded that standard SQL systems are most efficient for accounting tasks requiring strong consistency with ACID properties and calculation transparency.

Keywords: SQL, relational database, RTA, insurance payments, data integrity, DDL, NoSQL

For citation: Zorkin D. Yu., Asanova N. V. Structured query language for data management of vehicles and road traffic accidents. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):18–26. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-2>.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация процессов в транспортной сфере требует надежных инструментов для хранения структурированной информации. Несмотря на развитие NoSQL-решений, реляционные базы данных (RDBMS) остаются стандартом для учетных систем, требующих строгой согласованности данных (ACID), особенно в вопросах финансовых расчетов, таких как страховые выплаты [1, 2]. Цель работы – создание и верификация методики проектирования базы данных для учета (ДТП) и расчета ущерба, исключающей ошибки дублирования и потери данных. Подготовленный выбор данных может быть представлен в приложениях (через формы/отчеты) для обработки [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве инструмента реализации выбран язык SQL, обеспечивающий стандартизацию операций выборки и модификации данных. Проектирование выполнялось в три этапа.

1. Концептуальное моделирование путем выделения сущностей «Автомобиль», «Владелец», «Полис ОСАГО», «ДТП».

2. Приведение отношений к третьей нормальной форме (3НФ) для устранения избыточности. Например, данные о владельце вынесены в отдельный справочник, связанный с автомобилем через внешний ключ.

3. Написание DDL-скриптов.

Обоснование использования языка структурированных запросов (SQL)

Язык SQL является общепризнанным стандартом для управления реляционными базами данных (РБД) и обеспечивает строгое разделение функций на Язык определения данных (DDL) и Язык манипулирования данными (DML) [5]. Применение SQL в проектах, связанных с учетом и финансовыми расчетами, обеспечивает ряд ключевых преимуществ, подтвержденных мировым опытом [6, 7].

Стандартизация и переносимость: SQL является индустриальным стандартом, что гарантирует переносимость разработанного решения между различными промышленны-

ми СУБД (например, при масштабировании с Access на SQL Server или PostgreSQL) [7].

Гарантия целостности данных: использование DDL позволяет реализовать строгие ограничения целостности (PRIMARY KEY, FOREIGN KEY, CHECK) на уровне сервера, обеспечивая, что в базу данных будут внесены только корректные записи (например, номера автомашин, соответствующие ГОСТу).

Точность вычислений и аналитические возможности: DML позволяет выполнять сложные выборки и агрегирование данных на стороне СУБД. Это минимизирует нагрузку на клиентское приложение и, что критически важно для расчетов ущерба, обеспечивает точность финансовых вычислений за счет использования соответствующих типов данных (DECIMAL) и централизации бизнес-логики.

Для повышения производительности информационной системы при работе с массивами данных применяется индексация ключевых полей (на CarID, RegNumber, AccidentID), что существенно ускоряет процессы фильтрации.

Аналитическая составляющая работы основана на агрегатных функциях (SUM, COUNT), которые используются для вычисления статистических показателей и реализации алгоритма расчета страховой выплаты. В отличие от простого суммирования, расчет выплаты требует учета лимита ответственности по полису ОСАГО, что является примером встраивания сложной бизнес-логики в SQL-запрос.

Для вычисления итоговой суммы, подлежащей выплате с учетом лимита страхования, используется следующий запрос, который представлен на рис. 1.

Этот подход обеспечивает централизацию расчетов и является основой для масштабируемых аналитических систем [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и верифицирована методика проектирования реляционной базы данных, ориентированная на строгий учет транспортных средств, владельцев и событий дорожно-транспортных происшествий (ДТП), а также на автоматизированный расчет страховых выплат.

```
SELECT
    c.RegNumber,
    SUM(CASE
        WHEN a.DamageAmount > p.LimitAmount THEN p.LimitAmount
        ELSE a.DamageAmount
    END) AS FinalPayout
FROM Cars c
JOIN Policies p ON c.CarID = p.CarID
JOIN Accidents a ON c.CarID = a.CarID
GROUP BY c.RegNumber;
```

Рис. 1. DDL-скрипт создания структуры всех ключевых таблиц базы данных

Примечание: составлено авторами.

Для описания структуры данных использовался язык определения данных (DDL). Предложенная структура соответствует требованиям третьей нормальной формы (3НФ), что устраняет избыточность и обеспечивает целостность данных, включая те сущности, которые были неполно или некорректно представлены в исходном материале (например, данные о владельцах).

Особое внимание уделено ограничениям целостности (Constraints).

1. Введены отдельные сущности для Владельцев (Owners), Страховых полисов (Policies) и ДТП (Accidents), которые корректно связаны между собой.

2. Применены ограничения CHECK для соответствия полей нормативно-правовым требованиям (например, для формата регистрационного знака по ГОСТ Р 50577–2018).

3. Для финансовых полей (LimitAmount, DamageAmount) установлен тип данных DECIMAL (15, 2), обеспечивающий строгую точность до копеек.

Полная, исправленная структура всех ключевых таблиц, заменяющая некорректные графические иллюстрации, представлена на рис. 2.

После успешного определения структуры данных выполняется наполнение таблиц тестовыми записями с помощью операторов

INSERT – основного элемента Языка манипулирования данными (DML). Приведенный на рис. 2 фрагмент демонстрирует, как данные о всех сущностях (автомобилях, владельцах, полисах и ДТП) вносятся в базу, проходя автоматическую валидацию через ограничения, определенные на рис. 3.

Для извлечения, анализа и обработки данных применяется команда SELECT. Разработанная модель требует обязательного объединения сущностей (JOIN) для получения полной картины инцидента, связывая информацию о ДТП с конкретным автомобилем и его актуальным страховым полисом.

Ключевым результатом работы является применение SELECT для реализации финансовой бизнес-логики. С его помощью, а также с использованием агрегатных функций и условной логики (CASE WHEN), реализуется расчет страховой выплаты с учетом лимита ответственности по полису ОСАГО.

В качестве примера реализации сложной бизнес-логики рассмотрим автоматизированный расчет суммы, подлежащей выплате в результате ДТП. Расчет страховой выплаты – является нетривиальной задачей, требующей сравнения заявленного ущерба с лимитом ответственности, установленным полисом ОСАГО.

```
-- Таблица 1: Cars (Автомобили)
CREATE TABLE Cars (
    CarID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    RegNumber NVARCHAR(9) NOT NULL
        CHECK (RegNumber LIKE '[A-Я] [0-9][0-9][0-9] [A-Я][A-Я]
[0-9][0-9]'),
    Model NVARCHAR(100) NOT NULL,
    VIN NVARCHAR(17) UNIQUE
);

-- Таблица 2: Owners (Владельцы) -- Заменяет Рис. 3, 4, 5, 6
CREATE TABLE Owners (
    OwnerID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    FullName NVARCHAR(200) NOT NULL,
    PassportData NVARCHAR(100) UNIQUE
);

-- Таблица 3: Policies (Полисы ОСАГО)
CREATE TABLE Policies (
    PolicyID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    CarID INT FOREIGN KEY REFERENCES Cars(CarID),
    OwnerID INT FOREIGN KEY REFERENCES Owners(OwnerID),
    PolicyNumber NVARCHAR(20) UNIQUE NOT NULL,
    LimitAmount DECIMAL(15, 2) NOT NULL
);

-- Таблица 4: Accidents (ДТП)
CREATE TABLE Accidents (
    AccidentID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    PolicyID INT FOREIGN KEY REFERENCES Policies(PolicyID),
    AccidentDate DATE NOT NULL,
    DamageAmount DECIMAL(15, 2) NOT NULL
);
```

Рис. 2. DDL-скрипт создания структуры всех ключевых таблиц базы данных

Примечание: составлено авторами

```
-- DML: Наполнение таблицы Cars (Автомобили)

INSERT INTO Cars (RegNumber, Model, VIN) VALUES

('A 123 AA 34', 'Lada Vesta SW', 'X7L00000000000001');


-- DML: Наполнение таблицы Owners (Владельцы)

INSERT INTO Owners (FullName, PassportData) VALUES

('Иванов Иван Иванович', '1234 567890');


-- DML: Наполнение таблицы Policies (Полисы)

INSERT INTO Policies (CarID, OwnerID, PolicyNumber, LimitAmount) VALUES

(1, 1, '0123456789', 400000.00);


-- DML: Наполнение таблицы Accidents (ДТП)

INSERT INTO Accidents (PolicyID, AccidentDate, DamageAmount) VALUES

(1, '2025-10-20', 150500.50);
```

Рис. 3. Фрагмент DML-скрипта для наполнения всех ключевых таблиц

Примечание: составлено авторами.

Для решения этой задачи используется агрегатный запрос, объединяющий данные из таблиц Accidents, Policies, Cars и Owners. Ключевой элемент запроса – условный оператор CASE WHEN, который позволяет реализовать логику ограничения выплаты страховым лимитом. Применение агрегатной функции SUM обеспечивает корректное суммирование выплат по каждому автомобилю (при необходимости).

Финальный расчетный запрос, демонстрирующий применение оператора JOIN для связывания сущностей и условной логики для вычислений, представлен на рис. 4. Полученный результат (FinalPayout) является непосредственным итогом работы информационной системы и может быть использован в отчете «Страховые выплаты».

Приведенный на рис. 4 запрос подтверждает, что разработанная структура позволяет не только хранить, но и эффективно анализировать данные. Реализация сложной логики

на уровне сервера БД обеспечивает централизацию бизнес-правил и гарантию точности финансовых расчетов, что является ключевым преимуществом перед ненормализованными решениями.

Сравнение с альтернативными подходами к управлению данными

Помимо реляционных СУБД, в последние годы получили развитие альтернативные модели хранения данных. Сравним реляционный подход (SQL), Нереляционные Базы Данных (NoSQL) и Новый Структурированный Язык Запросов (NewSQL) подходы в контексте транспортной предметной области.

Реляционные СУБД (SQL). Классические SQL-решения обеспечивают формальную согласованность данных: Атомарность, Согласованность, Изолированность, Долговечность (АСИД-транзакции) и позволяют выразительно описывать сложные связи через JOIN [9]. Как отмечено в обзорах по транспортным данным, реляционные СУБД «широко

```
SELECT

    c.RegNumber,

    o.FullName AS OwnerName,

    p.LimitAmount AS PolicyLimit,

    a.DamageAmount AS DeclaredDamage,

    -- Применение условной логики для расчета фактической выплаты

    SUM(CASE

        -- Если заявленный ущерб больше лимита, выплачивается лимит

        WHEN a.DamageAmount > p.LimitAmount THEN p.LimitAmount

        -- Иначе, выплачивается заявленный ущерб

        ELSE a.DamageAmount

    END) AS FinalPayout

FROM Accidents a

JOIN Policies p ON a.PolicyID = p.PolicyID

JOIN Cars c ON p.CarID = c.CarID

JOIN Owners o ON p.OwnerID = o.OwnerID

GROUP BY

    c.RegNumber, o.FullName, p.LimitAmount, a.DamageAmount

ORDER BY c.RegNumber;
```

Рис. 4. SQL-запрос для расчета страховых выплат с учетом лимита ОСАГО

Примечание: составлено авторами.

используются для управления различными формами транспортных данных» [9]. Они позволяют легко оперировать пространственными и временными атрибутами (например, через расширения PostGIS) [9]. К достоинствам SQL-модели относится строгость и надежность схемы [9].

Однако у традиционных реляционных моделей есть ограничения: при очень больших потоках данных (Big Data) и быстро меняющихся структурах (например, динамических топологиях дорожных сетей) реляционные таблицы могут требовать сложной перестройки схемы. Указано, что «реляционное моделирование недостаточно гибко при сложных и эволюционирующих структурах данных»,

что особенно важно для комплексных транспортных сетей [9]. Дополнительное хранилище (NoSQL, хранилища Data Lake) внедряется для оптимизации таких случаев, но при этом возрастает сложность интеграции данных в реальном времени. Таким образом, традиционные SQL-базы хорошо подходят для статичных структурированных данных (регистрационные учеты, финансовые отчеты и т.п.), но могут испытывать трудности при обработке в режиме «реального времени» и неструктурированной информации без адаптации инфраструктуры [9].

Нереляционные СУБД (NoSQL). NoSQL-решения включают различные типы (документные, графовые, ключ-значение,

колоночные) и ориентированы на гибкость схемы и масштабируемость [9]. Они часто соответствуют принципам Доступный, Мягкое состояние, Постепенно согласованный (BASE) [9] и хорошо подходят для неструктурированных и полуструктурированных данных – например, больших потоков телеметрии, логов, JSON-документов маршрутов и др. В транспортной сфере NoSQL может применяться для хранения сетевых графов дорог в графовых Баз Данных (БД), потоковых данных от датчиков (ключ-значение), данных справочников маршрутов (JSON в документных базах данных) [10]. Как отмечают исследователи, миграция смарт-городских решений на NoSQL оправдана при «больших объемах и Big Data» [10]. К примеру, в проектах умного города Документ-Ориентированная Система Управления Базами Данных (MongoDB) и Удаленный Сервер Словарей (Redis) показали высокую производительность и масштабируемость на гибких данных [10].

Но есть и минусы: отказ от строгой ACID-согласованности может быть критичным для финансовых расчетов или юридически значимых операций (в страховании ДТП, регистрациях). Кроме того, в NoSQL сложнее выполнять сложные JOIN-операции по нескольким таблицам, а поддержание целостности данных обычно ложится на приложение. Таким образом, NoSQL-базы выгодны при необходимости обработки разноформатных больших объемов данных (обходя необходимость жестких схем), но могут уступать в связности и согласованности для традиционных учетных задач.

NewSQL-системы. NewSQL – сравнительно новый класс СУБД, который сочетает привычный SQL-интерфейс с современными технологиями масштабирования [11]. Такие системы сохраняют полную совместимость с SQL (нет необходимости учить новый язык), но используют распределенные и in-memory архитектуры для достижения высокой производительности [11]. Примеры NewSQL: VoltDB, NuoDB, CockroachDB. Эти системы обещают горизонтальную масшта-

бируемость без потери ACID [11]. В контексте транспортных приложений NewSQL может быть актуален для распределенных облачных систем с экстремальными требованиями к пропускной способности (например, обработка миллиарда записей телеметрии в реальном времени). Однако NewSQL – более сложная в развртывании технология, и ее преимущества проявляются в тех случаях, когда традиционные СУБД уже не справляются с нагрузкой.

В целом выбор подхода зависит от задач: для большинства классических систем учета ДТП реляционные СУБД с SQL остаются оптимальным вариантом благодаря гибкости запросов и надежности схемы. NoSQL может дополнять решения при работе с потоковыми или графовыми данными, а NewSQL обеспечивает перспективу масштабирования при росте объемов. Мы видим, что нет единого решения на все случаи: комбинация реляционной модели (для основного учета), и при необходимости, специальных хранилищ (NoSQL) является разумной стратегией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была разработана и верифицирована методика проектирования реляционной базы данных для интегрированного учета транспортных средств, владельцев и дорожно-транспортных происшествий.

Показано, что применение Языка определения данных (DDL), включая ограничения CHECK на уровне сервера, обеспечивает строгое соблюдение нормативных требований к вводимым данным (например, формату регистрационного номера по ГОСТу), достичь которого невозможно в нереляционных или файловых системах.

На основе языка манипулирования данными (DML) и агрегатных функций был реализован механизм автоматизированного расчета страховых выплат. Тип данных DECIMAL и условная логика CASE WHEN обеспечили финансовую точность расчетов. Это гарантировало корректный учет лимитов ответственности по полису ОСАГО.

Проведенное критическое сравнение подходов SQL, NoSQL и NewSQL показало, что реляционная модель – наиболее надежное

и оптимальное решение. Именно реляционная модель гарантирует транзакционную целостность (ACID).

Список источников

1. Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database system concepts. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2019. 1376 p.
2. Coronel C., Morris S. Database systems: Design, implementation, & management. 13th ed. Boston : Cengage Learning, 2018. 816 p.
3. Таланов В. М., Рунков М. В., Ерофеев Г. В. Пример создания базы данных в системе управления базами данных MySQL // XLVI Огарёвские чтения : материалы научной конференции, 6–13 декабря 2017 г., г. Саранск. В 3-х частях. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, 2018. Часть 1. С. 219–224.
4. Коннолли Т., Бегг К. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / пер. с англ. М. : Вильямс, 2017. 1440 с.
5. Грофф Дж. Р., Вайнберг П. Н., Оппель А. Дж. SQL: Полное руководство / пер. с англ. 3-е изд. СПб. : Диалектика, 2019. 960 с.
6. Соколин Д. Д., Тимохович А. С. Методы комплексного обеспечения безопасности SQL-сервера от атак типа SQL-инъекции // Academy. 2017. № 3 (18). С. 7–9.
7. Gondal S., Davkhure V., Shivalkar A. et al. No SQL – Not obligatory SQL (Natural language to SQL conversion) // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2023. Vol. 5, no. 4. P. 1304–1308. <https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS35725>.
8. Буняева Е. В., Романова А. Г. Различия диалектов языка SQL в СУБД Microsoft SQL Server и PostgreSQL // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр – МКРНИП) : сборник материалов XXIX Международной научно-практической конференции, 28 июня 2024 г., г. Москва, Москва : Издательство «Экономическое образование», 2024. С. 232–241.
9. Bellini P., Bilotta S., Collini E. et al. Data sources and models for integrated mobility and transport solutions // Sensors. 2024. Vol. 24, no. 2. P. 441. <https://doi.org/10.3390/s24020441>.
10. Gusti Ayu Mas Ekayanti, Dewa Ayu Deby Cintiya, Putu Yoga Suartana et al. Comparison of SQL sus, SQL ninja, and the mole tools in implementing SQL injection // Jurnal Informatika Teknologi dan Sains. 2022. Vol. 4, no. 4. P. 478–482. <https://doi.org/10.51401/jinteks.v4i4.2201>.
11. Pina E., Sá F., Bernardino J. NewSQL databases assessment: CockroachDB, MariaDB Xpand, and VoltDB // Future Internet. 2023. Vol. 15, no. 1. <https://doi.org/10.3390/fi15010010>.

References

1. Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database system concepts. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2019. 1376 p.
2. Coronel C., Morris S. Database systems: Design, implementation, & management. 13th ed. Boston: Cengage Learning; 2018. 816 p.
3. Talanov V. M., Runkov M. V., Erofeev G. V. Primer sozdaniya bazy dannykh v sisteme upravleniya bazami dannykh MySQL. In: *Proceedings of the Scientific Conference “XLVI Ogarevskie chteniya”*, December 6–13, 2017, Saransk. In 3 pts. Saransk: National Research Ogarev Mordovia State University; 2018. Pt. 1. p. 219–224. (In Russ.).
4. Connolly T., Begg C. Databases: Design, implementation, and maintenance. Theory and practice. Trans. Moscow: Williams; 2017. 1440 p. (In Russ.).
5. Groff J. R., Weinberg P. N., Oppel A. J. SQL: The complete reference. Trans. 3rd ed. St. Petersburg: Diialektika; 2019. 960 p. (In Russ.).
6. Sokolin D. D., Timokhovich A. S. Metody kompleksnogo obespecheniya bezopasnosti SQL-servera ot atak tipa SQL-ineksii. *Academy*. 2017;(3):7–9. (In Russ.).
7. Gondal S., Davkhure V., Shivalkar A. et al. No SQL – Not obligatory SQL (Natural language to SQL conversion). *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2023;5(4):1304–1308. <https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS35725>.
8. Bunyaeva E. V., Romanova A. G. Differences in SQL language dialects in Microsoft SQL Server and PostgreSQL DBMS. In: *Proceedings of the 29th International Research-to-Practice Conference “Razvitie nauki i praktiki v globalno menyayushchemsya mire v usloviyakh riskov (shifr – MKRNP)”*, June 28, 2024, Moscow. Moscow: “Economic Education” Publishing House; 2024. p. 232–241. (In Russ.).
9. Bellini P., Bilotta S., Collini E. et al. Data sources and models for integrated mobility and transport solutions. *Sensors*. 2024;24(2):441. <https://doi.org/10.3390/s24020441>.
10. Gusti Ayu Mas Ekayanti, Dewa Ayu Deby Cintiya, Putu Yoga Suartana et al. Comparison of SQL sus, SQL ninja, and the mole tools in implementing SQL injection. *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains*. 2022;4(4):478–482. <https://doi.org/10.51401/jinteks.v4i4.2201>. (In Indonesian).
11. Pina E., Sá F., Bernardino J. NewSQL databases assessment: CockroachDB, MariaDB Xpand, and VoltDB. *Future Internet*. 2023;15(1). <https://doi.org/10.3390/fi15010010>.

Информация об авторах

Д. Ю. Зорькин – преподаватель;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com✉

Н. В. Асанова – кандидат технических наук,
доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-3781-7017>,
natali_as@mail.ru

About the authors

D. Yu. Zorkin – Lecturer;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com✉

N. V. Asanova – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent;
<https://orcid.org/0000-0003-3781-7017>,
natali_as@mail.ru

Методика проектирования двухтрансформаторного резонансного преобразователя с оптимизацией индуктивностей для расширения диапазона мягкой коммутации

Александр Александрович Пирогов¹, Марина Владимировна Хорошайлова¹,
Павел Викторович Зобов², Элеонора Викторовна Сёмка²✉

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Минобороны России, Воронеж, Россия

Аннотация. Проведен анализ современных топологий высокочастотных изолированных преобразователей постоянного тока, включая мостовые схемы с фазовым управлением и резонансные LLC-преобразователи. Выявлены их ключевые недостатки, такие как значительная циркуляционная мощность, узкий диапазон мягкой коммутации и повышенные коммутационные потери в ряде режимов. В качестве перспективного объекта исследования выбрана двухтрансформаторная резонансная топология, преимущество которой заключается в распределении энергетических потоков и подавлении пиковых токов.

Моделирование стационарного режима работы преобразователя методом приближения основных гармоник показало, что выходной мощностью можно эффективно управлять с помощью единственного параметра – фазового сдвига между управляющими сигналами полумостов. Исследовано влияние коэффициента трансформации на граничные условия коммутации при нулевом напряжении (Zero Voltage Switching, ZVS). Установлено, что оптимальное соотношение индуктивностей трансформаторов позволяет существенно расширить диапазон нагрузок, при которых сохраняется мягкая коммутация всех силовых ключей, вплоть до режима холостого хода.

Разработан метод проектирования преобразователя, включающий алгоритм оптимизации параметров силовой части для минимизации потерь проводимости и расширения ZVS-диапазона. Методика включает поэтапный выбор индуктивности рассеяния, коэффициента трансформации, геометрии магнитопровода и числа витков обмоток, обеспечивающих выполнение заданных требований по эффективности и массогабаритным показателям. Экспериментальные исследования подтвердили высокую энергоэффективность преобразователя с коэффициентом полезного действия (КПД) свыше 96 % в широком диапазоне нагрузок и устойчивое поддержание режима мягкой коммутации.

Ключевые слова: изолированный преобразователь постоянного тока, двухтрансформаторная топология, оптимизация параметров, фазовое управление, коэффициент трансформации, энергоэффективность, коммутация при нулевом напряжении

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

Для цитирования: Пирогов А. А., Хорошайлова М. В., Зобов П. В., Сёмка Э. В. Методика проектирования двухтрансформаторного резонансного преобразователя с оптимизацией индуктивностей для расширения диапазона мягкой коммутации // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 27–38. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-3>.

Original article

Designing dual-transformer resonant converter with inductance optimization to expand soft switching range

Aleksandr A. Pirogov¹, Marina V. Khoroshailova¹, Pavel V. Zobov², Eleonora V. Syomka²✉

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

Abstract. The paper analyses modern topologies of high-frequency isolated direct current (DC) converters, including phase-controlled bridge circuits and resonant LLC converters. The study defines the following key disadvantages of the aforementioned converters: significant circulating power, narrow soft switching range, and increased switching losses in a number of modes. The scope of the research encompasses a dual-transformer resonant topology, which provides advantages in distributing energy flows and suppressing peak currents.

Simulation of the converter's steady-state operation using the fundamental approximation has shown that the output power can be substantively manipulated by means of a single characteristic, i.e. phase-shift of the half-bridges control signals. The authors study the transformer ratio's influence on the limit conditions of zero voltage switching (ZVS). The article establishes that the optimal ratio of transformer inductances significantly expands the load range at which soft switching of all power switches remains unchanged up to the open-circuit.

The work develops a converter design method that contains an algorithm for optimizing the power contour characteristics to minimize conduction losses and expand the ZVS range. The technique consists in a sequential selection of the leakage inductance, transformer ratio, magnetic core shape and number of windings' turns, ensuring compliance with the set requirements in terms of efficiency, weight and size. The experiment confirms high energy efficiency of the converter (over 96%) in a wide load range and stable maintenance of the soft switching mode.

Keywords: isolated direct current (DC) converter, dual-transformer topology, characteristic optimization, phase-shift control, transformer ratio, energy efficiency, zero voltage switching

Funding: the research is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment "Youth laboratory" No. FZGM-2024-0003.

For citation: Pirogov A. A., Khoroshailova M. V., Zobov P. V., Syomka E. V. Designing dual-transformer resonant converter with inductance optimization to expand soft switching range. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):27–38. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-3>.

ВВЕДЕНИЕ

Изолированные преобразователи постоянного тока играют ключевую роль в развитии современных энергетических систем. Их критически важная роль заключается в обеспечении гальванической развязки и преобразовании уровня напряжения, что необходимо для обеспечения безопасности, повышения надежности и функциональной гибкости силовых каналов. В данном контексте особую актуальность приобретают топологии, способные обеспечить высокий коэффициент полезного действия, широкий диапазон регулирования и высокую плотность мощности.

Наиболее перспективными в этом отношении являются схемы с мягкой коммутацией, которые позволяют минимизировать коммутационные потери, что особенно важно при работе на повышенных частотах.

Среди множества предложенных решений традиционно выделяются двунаправленные преобразователи с двойным активным мостом и резонансные LLC-преобразователи [1–7]. Однако их широкое практическое применение сталкивается с рядом проблем. Преобразователи с двойным активным мостом характеризуются значительной циркуляционной мощностью реактивных токов в ряде

режимов, что снижает общий КПД, а также требуют реализации сложных алгоритмов управления. В свою очередь, LLC-преобразователи, обеспечивая превосходные характеристики вблизи резонансной частоты, демонстрируют резкое ухудшение эффективности при отклонении от нее, проявляющееся в росте циркуляционных токов и сужении диапазона регулирования [3, 5]. Многочисленные модификации данных топологий, хотя и направлены на смягчение этих недостатков, зачастую приводят к чрезмерному усложнению системы управления или не полностью решают проблемы обеспечения устойчивой мягкой коммутации во всем диапазоне нагрузок.

В данной связи особый научный и практический интерес представляет концепция двухтрансформаторных преобразователей, которые потенциально способны объединить преимущества резонансных и мостовых топологий. Известные решения данного класса демонстрируют подавление пиковых токов и расширение диапазона мягкой коммутации. Тем не менее, они часто страдают от дисбаланса магнитных компонентов, высоких циркуляционных потерь, ограниченного диапазона коммутации при нулевом напряжении в понижающем режиме и недостаточной плотности мощности. Таким образом, актуальной задачей является разработка новой методики проектирования такого преобразователя, которая позволила бы системно устранить указанные недостатки за счет целенаправленной оптимизации его ключевых параметров.

Целью настоящей работы является разработка методики проектирования высокочастотного двухтрансформаторного резонансного преобразователя, направленная на минимизацию мощности обратного потока, снижение токовой нагрузки на вторичной стороне и максимальное расширение диапазона коммутации при нулевом напряжении. Достижение этой цели базируется на комплексном анализе стационарных и динамических характеристик схемы, выводе аналитических выражений для границ режима мягкой коммутации и последующей параме-

трической оптимизации силовой части преобразователя. Предлагаемый подход призван обеспечить существенное повышение энергоэффективности и массогабаритных показателей устройства по сравнению с традиционными резонансными и ШИМ-топологиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа работы двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя применяется метод приближений основных гармоник. Данный подход является корректным, поскольку формы напряжений и токов в резонансном контуре на практике близки к синусоидальным, и высшие гармоники оказывают пренебрежимо малое влияние на общую энергетическую систему. Для упрощения математического моделирования параметры первичной обмотки высокочастотных трансформаторов приводятся к вторичной стороне. В рамках данной модели принят ряд допущений: все компоненты схемы, включая активные и пассивные элементы, а также трансформаторы, считаются идеальными. Такое допущение позволяет абстрагироваться от паразитных эффектов и сосредоточиться на фундаментальных принципах работы преобразователя. Кроме того, эффект мертвого времени (мертвого зазора) в управлении ключевыми транзисторами не учитывается.

Эквивалентная схема замещения (рис. 1) получена методом приближений основных гармоник и содержит два приведенных источника напряжения V_{xz} и V_{yz} , которые представляют собой квазисинусоидальные аппроксимации выходных напряжений мостовых инверторов. Нормализованные значения источников отраженного напряжения V'_{xz} , V'_{yz} , $V'_{xz,pu}$ и $V'_{yz,pu}$ таковы:

$$\begin{aligned} V'_{xz,pu}(\omega_S t) &= \frac{1}{n_1} V_{xz,pu}(\omega_S t) = \frac{2}{\pi} \sin(\omega_S t), \\ V'_{yz,pu}(\omega_S t) &= \frac{1}{n_2} V_{yz,pu}(\omega_S t) = \frac{2}{k\pi} \sin(\omega_S t - \alpha). \end{aligned} \quad (1)$$

Нормированный ток $i_{r,pu}$ в резонансном контуре рассчитывается согласно закону Ома для комплексных амплитуд как разность эквива-

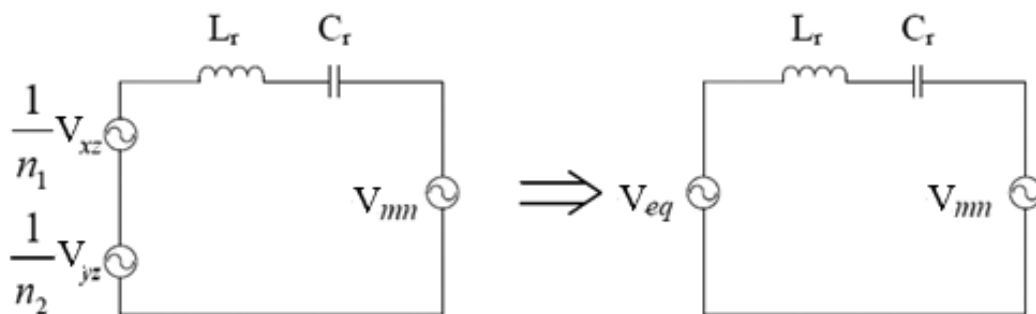


Рис. 1. Эквивалентная схема, полученная методом приближения основных гармоник двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя

Примечание: составлено авторами.

лентного напряжения источника и напряжения на нагрузке, деленная на полное сопротивление резонансного контура (уравнение (2)):

$$i_{r,pu}(\omega_s t) = \frac{V_{eq,pu}(\omega_s t) - V_{mn,pu}(\omega_s t)}{1 + j\left(QF - \frac{Q}{F}\right)}, \quad (2)$$

где $V_{eq,pu}(\omega_s t)$ – нормированное эквивалентное напряжение источника, $V_{mn,pu}(\omega_s t)$ – нормированное напряжение на нагрузке в схеме замещения, Q – добротность резонансного контура, $F = \omega_s / \omega_r$ – относительная частота переключения, ω_r – резонансная частота контура, ω_s – частота переключения.

Резонансный ток описывается косинусоидальной функцией

$$i_{r,pu}(\omega_s t) = I_{r,pu} \cdot \cos(\omega_s t + \angle i_{r,pu}). \quad (3)$$

Амплитуда $I_{r,pu}$ и фазовый угол $\angle i_{r,pu}$ являются функциями параметров Q, F, M, k, α :

$$I_{r,pu} = \frac{2}{\pi^2 \left(1 + \left(QF - \frac{Q}{F}\right)\right)} \sqrt{4M^2 - 4M \frac{1}{k} \cos(\gamma - \alpha) - 4M \cos \gamma + \frac{2}{k} \cos \alpha + \left(\frac{1}{k}\right)^2 + 1},$$

$$\angle i_{r,pu} = \arctg \left(\frac{2M \sin \gamma - \frac{1}{k} \sin \alpha}{1 + \frac{1}{k} \cos \alpha - 2M \cos \gamma} \right), \quad (4)$$

где M – коэффициент усиления по напряжению, k – это отношение коэффициентов трансформации второго и первого трансформаторов (n_2/n_1), α – фазовый угол, на который

управляющие сигналы второго мостового инвертора сдвинуты относительно сигналов первого мостового инвертора, γ – это фазовый сдвиг между напряжением на нагрузке $V_{mn,pu}$ и резонансным током $I_{r,pu}$.

Таким образом, нормализованную выходную мощность можно выразить как

$$P_{L,pu} = \frac{4M}{\pi^2 \left(1 + \left(QF - \frac{Q}{F}\right)\right)} \left(\sin \gamma + \frac{1}{k} \sin(\gamma - \alpha) \right). \quad (5)$$

Ключевым условием для дальнейшего анализа является требование, вытекающее из работы выходного диодного выпрямителя, а именно $\gamma = 0$, где γ – угол сдвига фаз между напряжением и током в нагрузочной части схемы, что соответствует синфазности тока через выпрямитель и напряжения на нем.

Это означает, что момент перехода резонансного тока через ноль должен совпадать с моментом, когда фазовый угол напряжения равен $\gamma + \pi/2$. Данное фазовое условие позволяет установить фундаментальную связь между углами управления γ, α и коэффициентом усиления M , которая выражается уравнением

$$2M = \cos \gamma + \frac{1}{k} \cos(\gamma - \alpha). \quad (6)$$

На рис. 2 представлена система графиков резонансного преобразователя с двойным активным мостом для различных значений коэффициента трансформации k . Амплитуда напряжения достигает максимума при нулевом фазовом угле и минимальна при 180° (рис. 2а), причем меньшие значения k (0,5)

обеспечивают более высокую амплитуду по сравнению с большими значениями k (2,0). Фазовая характеристика изменяется нелинейно, и при малых значениях k фаза изменяется более резко, а при больших k – более плавно (рис. 2б).

Нормированные напряжения V_{xz} , V_{yz} , эквивалентное напряжение V_{eq} , напряжение на-

грузки V_{mn} и резонансный ток i_r от угла сдвига фаз представлены на рис. 2в. Фазовое соотношение между сигналами: V_{yz} отстает от V_{xz} на угол 60° , эквивалентное напряжение V_{eq} имеет промежуточную фазу, а резонансный ток i_r сдвинут на 90° относительно напряжений, что характерно для резонансного контура (рис. 2в).

Базовое напряжение $V_B = 100.00$ В
Базовое сопротивление $Z_B = 2.30$ Ом
Базовый ток $I_B = 43.48$ А
Резонансная частота $f_r = 71.18$ кГц

Параметры расчетов:

$Q = 2.0$, $F = 1.0$, $k = 1.0$, $M = 0.8$

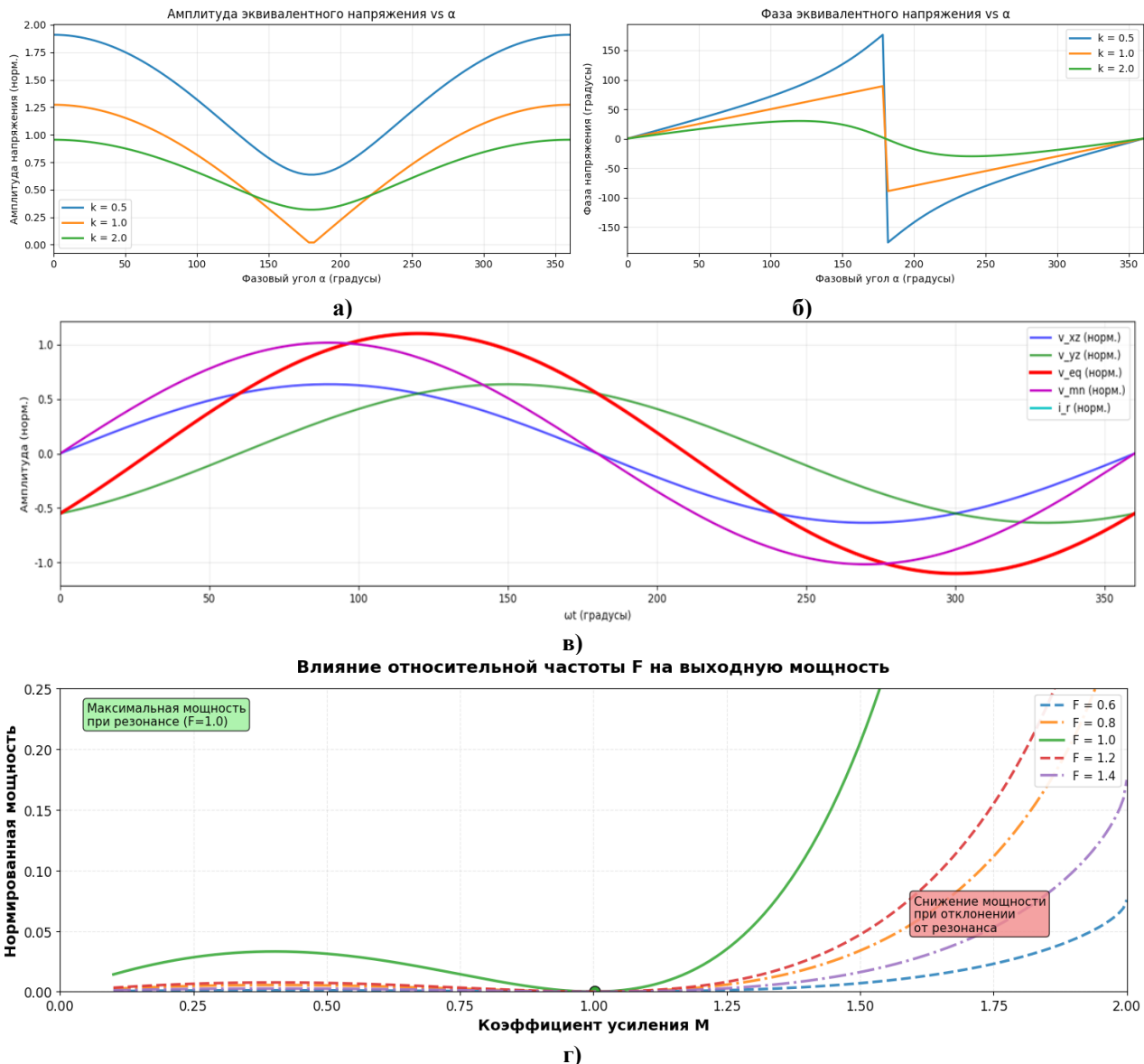


Рис. 2. Анализ предельных режимов работы резонансного преобразователя

а) зависимость амплитуды эквивалентного напряжения от фазового угла α ;

б) зависимость фазы эквивалентного напряжения от фазового угла α ;

в) временная диаграмма напряжений и тока;

г) влияние частоты F на мощность ($\alpha = 60^\circ$; $k = 1.0$; $Q = 2.0$)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Анализ влияния относительной частоты переключения F (рис. 2г), где $F = f_s / f_r$ – безразмерный параметр, демонстрирует, что работа на резонансной частоте ($f_s = f_r = 71,18$ кГц) обеспечивает максимальную выходную мощность.

Отклонение от резонанса в сторону как уменьшения ($F = 0,6$), так и увеличения ($F = 1,4$) частоты приводит к существенному снижению мощности, которое обусловлено ростом импеданса резонансного контура вне резонансной частоты и является более выраженным при больших значениях коэффициента усиления M , что подтверждает необходимость работы вблизи $F = 1,0$ для достижения высоких мощностных показателей.

Все полученные графики согласуются с теоретическими ожиданиями и подтверждают основные принципы работы резонансного преобразователя: возможность плавного регулирования мощности фазовым углом, наличие оптимального коэффициента усиления M , важность работы вблизи резонансной частоты и влияние добротности контура на энергетические характеристики системы.

Основным требованием для обеспечения работы ключей в режиме коммутации при нулевом напряжении (ZVS) является наличие отрицательного тока через ключ в момент его включения. Данное условие обеспечивает разряд паразитной выходной емкости ключа до его включения, создавая необходимые условия для коммутации при нулевом напряжении:

$$\begin{cases} i_r(t_0) < 0 \\ i_r(t_1) < 0 \\ i_r(t_2) > 0 \\ i_r(t_3) < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_r(t_0) = -i_r(t_2) < 0 \\ i_r(t_1) = -i_r(t_3) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Процесс оптимизации коэффициента трансформации k начинается с анализа граничной выходной мощности, при которой преобразователь теряет режим мягкой коммутации (ZVS). На этом этапе выявляется ключевое различие между топологиями. Для классического резонансного ШИМ-преобразователя, который является частным случаем

двухтрансформаторной схемы при $k = 1$, эта граничная мощность является величиной постоянной, жестко заданной выбранным коэффициентом усиления M . Предложенный двухтрансформаторный преобразователь обладает степенью свободы – граничная мощность для него становится функцией параметра k , что и открывает возможность для целенаправленной оптимизации. На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма оптимизации рабочего режима коэффициента трансформации.

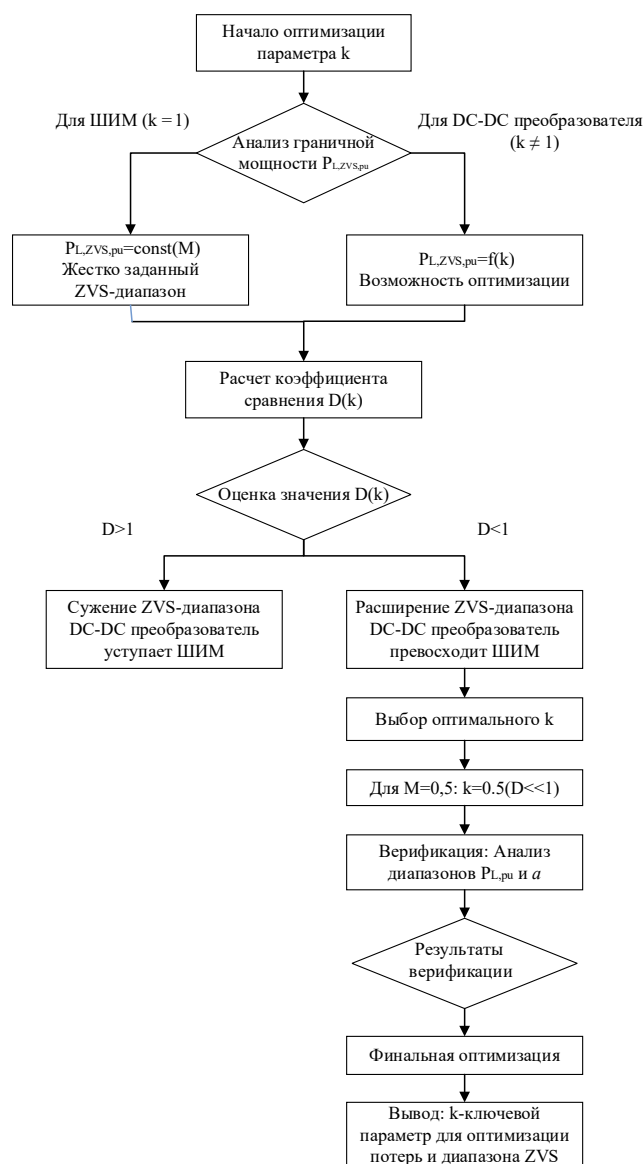


Рис. 3. Алгоритм оптимизации рабочего режима коэффициента трансформации

Примечание: составлено авторами.

Для количественной оценки преимущества вводится коэффициент D , который представляет собой отношение граничных мощно-

стей двухтрансформаторного преобразователя и его ШИМ-аналога. Этот коэффициент служит универсальным критерием эффективности выбранного значения k . Если значение D превышает единицу, это означает, что предлагаемая топология уступает классической – ее ZVS-диапазон сужается, что приводит к уменьшению времени перехода в режим жесткой коммутации с большими потерями. При значении D меньше единицы ZVS-диапазон расширяется, что свидетельствует об успехе оптимизации нагрузок, в котором сохраняется мягкое переключение. Аналитический расчет и графическая зависимость показывают, что для стандартного коэффициента усиления $M = 0,5$ оптимальным является значение $k = 0,5$, при котором коэффициент D становится значительно меньше единицы, что теоретически обещает исключительно широкий ZVS-диапазон вплоть до режима холостого хода.

Таким образом, необходимость и преимущество данной оптимизации заключаются в целенаправленном управлении коммутационными потерями, которые являются главным фактором, ограничивающим коэффициентом полезного действия (КПД) высокочастотных преобразователей. Классическая топология не позволяет влиять на этот параметр после выбора M . Оптимизация коэффициента k дает разработчику мощный инструмент, позволяющий спроектировать преобразователь с заранее заданными и улучшенными характеристиками: максимально широким диапазоном нагрузок, в котором коммутационные потери сведены к нулю, высоким общим КПД, особенно на частичной нагрузке, что критически важно для таких применений, как автомобильные зарядные устройства или системы резервного питания. Это преобразует параметр k из простого конструктивного соотношения в ключевой элемент проектирования энергоэффективных силовых систем.

На рис. 4 представлено отношение граничной выходной мощности для потери коммутации при нулевом напряжении при различных значениях k .

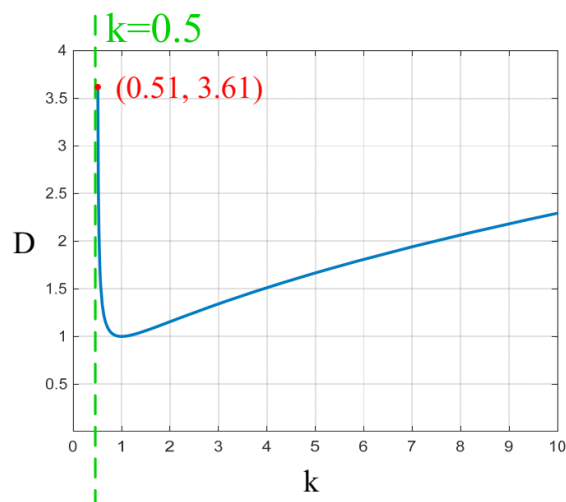


Рис. 4. Отношение граничной выходной мощности для потери коммутации при нулевом напряжении при различных значениях k

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

При $D > 1$ (рис. 4) двухтрансформаторный резонансный DC/DC-преобразователь теряет ZVS при более низкой выходной мощности по сравнению с ШИМ-аналогом, что эквивалентно сужению его ZVS-диапазона. При $D < 1$ (рис. 4) наблюдается более широкий диапазон нагрузок, в котором двухтрансформаторный резонансный DC/DC-преобразователь сохраняет способность к мягкому переключению.

После проведенного анализа и оптимизации блок-схема методики проектирования двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя, включающая алгоритм выбора компонентов и расчета режимов работы, обеспечивающая выполнение заданных требований по эффективности и массогабаритным показателям, имеет структуру, представленную на рис. 5.

Процесс начинается с формулировки исходных требований к преобразователю: номинальной мощности, входного и выходного напряжений, а также частоты коммутации. Данные параметры являются базовыми и задаются исходя из назначения устройства.

Следующий критически важный этап – выбор режимных параметров, который определяет все последующие расчеты и конечные характеристики преобразователя. Коэффици-

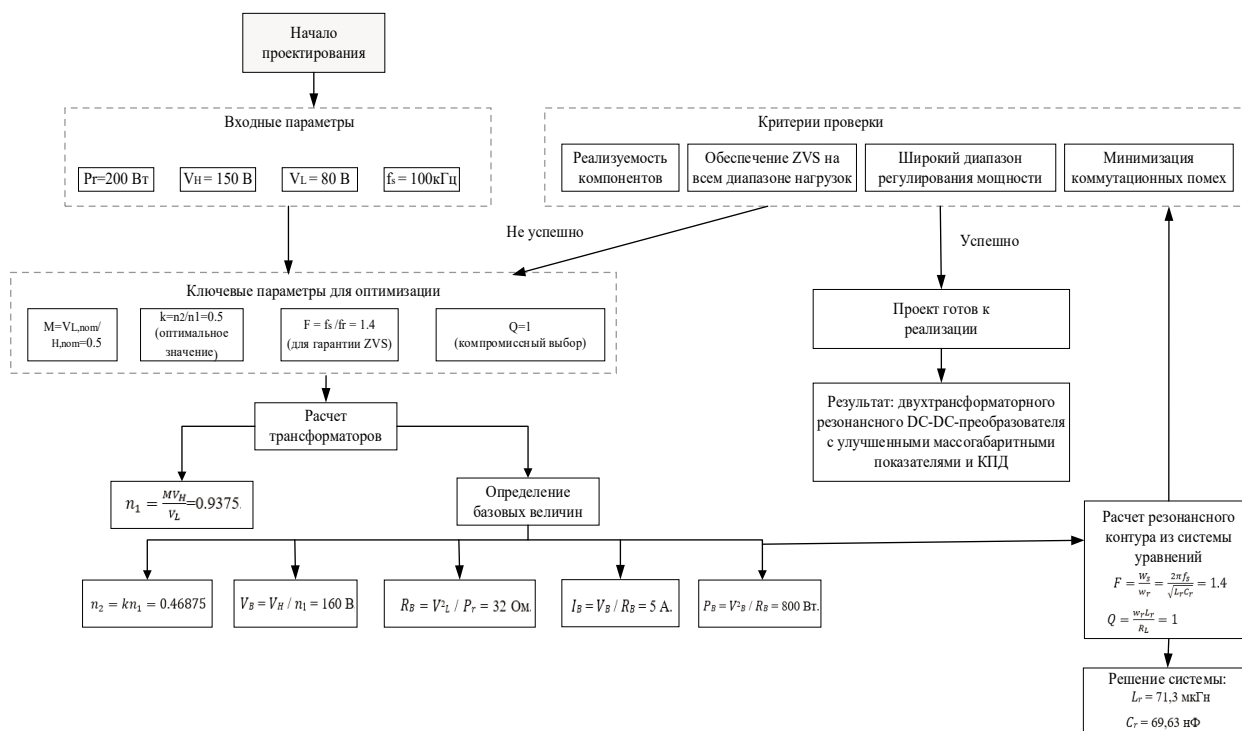


Рис. 5. Блок-схема проектирования двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя
 Примечание: составлено авторами.

ент усиления M задается соотношением номинальных напряжений. Параметр k является ключевым инструментом оптимизации; его выбор (в данном случае $k = 0,5$) напрямую влияет на расширение диапазона мягкой коммутации (ZVS) и снижение коммутационных потерь, что в итоге повышает КПД. Нормализованная частота F выбирается больше единицы для гарантированного обеспечения режима ZVS, а добротность Q является компромиссом между ограничением резонансного тока и динамическими характеристиками системы.

На основе выбранных параметров производится расчет трансформаторов – определяют коэффициенты трансформации для обеих ступеней. Затем выполняется приведение параметров к базовым величинам (напряжению, току, сопротивлению и мощности), что необходимо для унификации и упрощения последующих расчетов резонансного контура.

Заключительный этап – анализ и верификация спроектированного преобразователя по ключевым критериям: реализуемости рассчитанных компонентов; выполнению ус-

ловия ZVS в широком диапазоне нагрузок; ширине диапазона регулирования мощности и минимизации потерь. Если критерии не выполняются, процесс итеративно возвращается к этапу выбора режимных параметров для их корректировки. Успешное прохождение верификации означает, что проект соответствует всем заданным требованиям по эффективности и массогабаритным показателям и готов к практической реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации теоретических положений, изложенных в предыдущих разделах, было проведено всестороннее компьютерное моделирование работы предложенного двухтрансформаторного резонансного преобразователя. Ключевым аспектом анализа стало определение областей достижения режима нулевой коммутации напряжения (ZVS) для силовых ключей в зависимости от коэффициента трансформации k и фазового угла α . Область, в которой коммутаторы M_C и M_D теряют возможность мягкой коммутации, выделена красным на рис. 6.

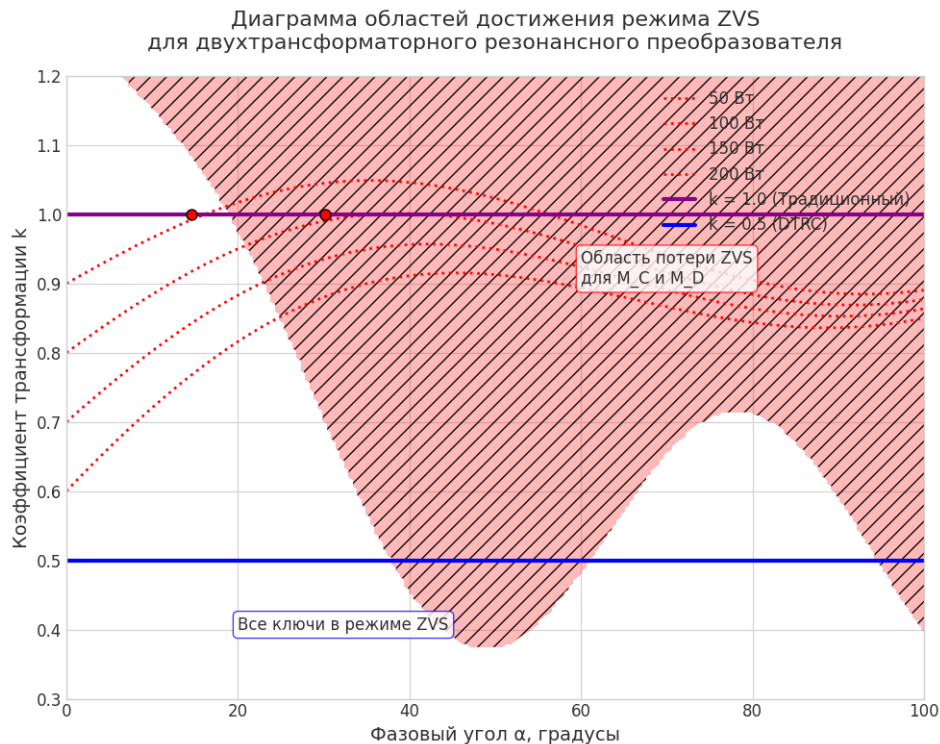


Рис. 6. Карта режимов мягкой коммутации двухтрансформаторного резонансного преобразователя в зависимости от коэффициента трансформации k и фазового угла α

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На графике четко выделяется заштрихованная область красного цвета, которая соответствует условиям, при которых силовые ключи M_C и M_D теряют способность к мягкой коммутации. Эта проблемная зона занимает существенную часть диаграммы, преимущественно в области высоких значений коэффициента трансформации, приближающихся к единице, и при определенных значениях фазового угла.

Поверх этой области нанесены четыре красные пунктирные линии, каждая из которых соответствует определенному уровню выходной мощности преобразователя: 50, 100, 150 и 200 ватт. Эти линии мощности имеют характерный нелинейный характер, отражающий физические зависимости в работе преобразователя. Наиболее важными элементами диаграммы являются две горизонтальные линии: фиолетовая, расположенная на уровне $k = 1,0$, и синяя, соответствующая значению $k = 0,5$. Фиолетовая линия, представляющая традиционную топологию преобразователя, последовательно пересекает все четыре линии

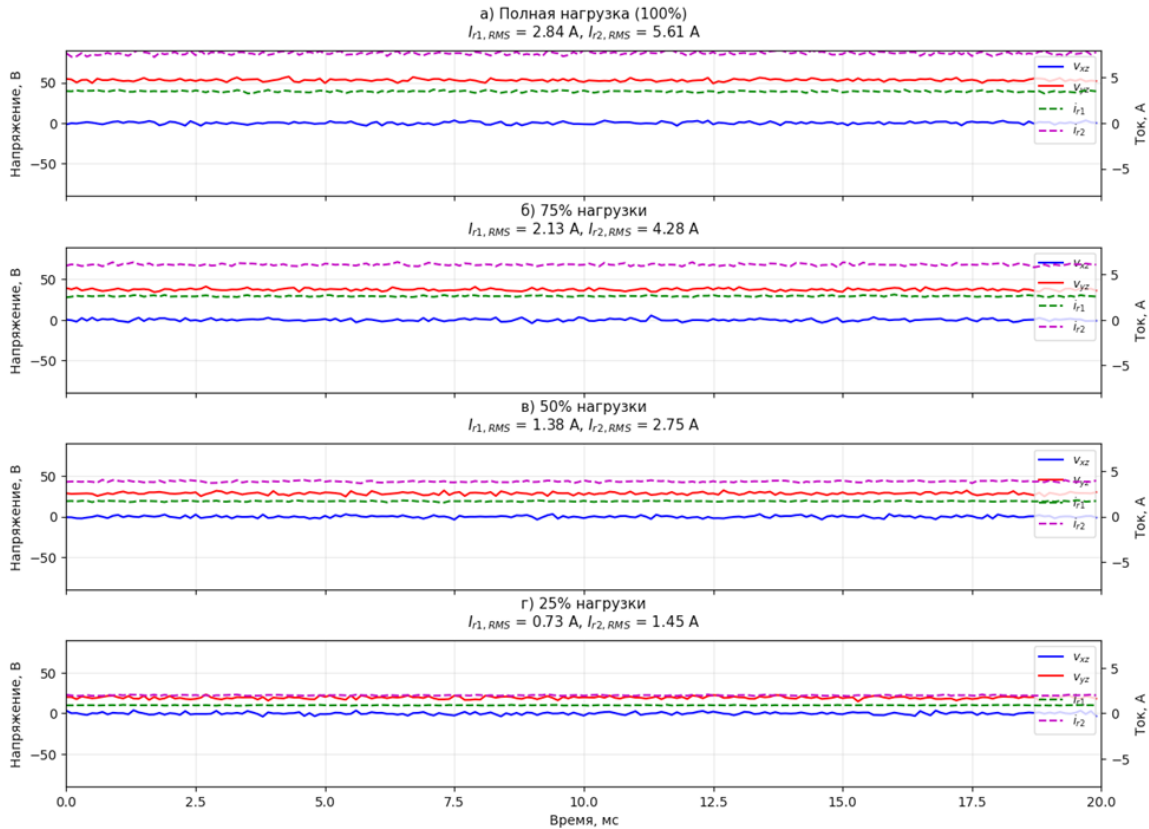
мощности строго внутри заштрихованной области. Это наглядно подтверждает известное ограничение классической схемы – при номинальном коэффициенте трансформации ключи M_C и M_D неизбежно теряют ZVS уже при мощности 100 ватт, что составляет половину номинальной мощности устройства.

Синяя линия (рис. 6), соответствующая предложенной топологии двухтрансформаторного резонансного преобразователя с пониженным коэффициентом трансформации до 0,5, демонстрирует принципиально иное поведение. Все четыре точки ее пересечения с линиями мощности располагаются за пределами проблемной зоны, в области устойчивого поддержания мягкой коммутации. Особенно показательно пересечение с линией 200 ватт, которое происходит при фазовом угле приблизительно 20 градусов и значении $k = 0,5$. Анализ положения других точек пересечения при мощностях 150, 100 и 50 ватт показывает, что преимущества новой топологии сохраняются на протяжении всего рабочего диапазона нагрузок. Расстояние от этих точек

до границы заштрихованной области составляет не менее 0,15–0,25 по оси коэффициента трансформации, что обеспечивает существенный запас по устойчивости работы преобразователя. Диаграмма показывает, что предложенная модификация топологии позволяет эффективно расширить диапазон нагрузок,

при которых преобразователь работает с высоким КПД за счет поддержания мягкой коммутации на всех ключах.

На рис. 7 отображены результаты экспериментальных измерений напряжений в средней точке V_{xz} , V_{yz} , а также токов i_{r1} , i_{r2} на первичной стороне преобразователя.



Сравнение теоретических и экспериментальных значений:

Нагрузка | Ir1 эксп (А) | Ir1 теор (А) | Ir2 эксп (А) | Ir2 теор (А)

100%	2.84	2.96	5.61	5.92
75%	2.13	2.22	4.28	4.44
50%	1.38	1.48	2.75	2.96
25%	0.73	0.74	1.45	1.48

Рис. 7. Результаты моделирования напряжений в средней точке V_{xz} , V_{yz} и токов i_{r1} , i_{r2} на первичной стороне преобразователя

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В условиях полной нагрузки, показанных на рис. 7а, полномостовая схема первичной стороны реализована в виде двух полумостовых структур. Два конденсатора C_1 и C_2 формируют общую среднюю точку, благодаря чему амплитуды напряжений V_{xz} и V_{yz} составляют $V_H / 2 = 150 / 2 = 75$ В. Величины токов i_{r1} и i_{r2} различаются вследствие неодинаковых коэффициентов трансформации двух высокочастотных

трансформаторов T_1 и T_2 . Экспериментально полученные среднеквадратичные значения резонансных токов составили $i_{r1,rms} = 2,84$ А и $i_{r2,rms} = 5,61$ А, что демонстрирует хорошую сходимость с теоретическими расчетами, согласно которым ожидалось значения 2,96 А и 5,92 А соответственно. Таким образом, расхождение между теоретическими и практическими результатами является незначительным.

На рис. 76–г иллюстрируются осциллограммы процессов при нагрузке 75 %, 50 % и 25 %: амплитуды напряжений остаются стабильными на всех уровнях мощности. Среднеквадратичные значения тока i_{r1} при этом составляют 2,13, 1,38 и 0,73 А, а тока i_{r2} – 4,28, 2,75, и 1,45 А, что также хорошо согласуется с теоретическими прогнозами. Кроме того, наблюдается характерная особенность: в момент включения резонансные токи являются

отрицательными для ключей M_A и M_C и положительными для M_B и M_D . Данное явление подтверждает достижение режима нулевой коммутации напряжения (ZVS) для всех активных переключателей во всех четырех исследуемых режимах мощности.

Коэффициент полезного действия преобразователя двухтрансформаторной резонансной топологии на четырех уровнях мощности представлен на рис. 8.

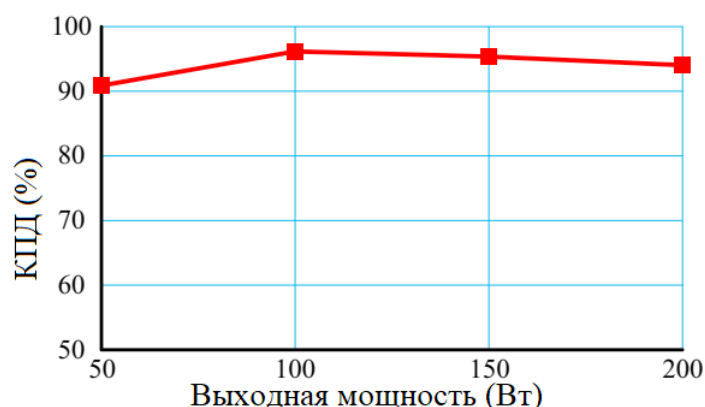


Рис. 8. КПД двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя при четырех уровнях нагрузки

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Значения КПД при мощности 200, 150, 100 и 50 Вт составили 94,02; 95,36; 96,16 и 90,87 % соответственно. Благодаря реализации режима мягкой коммутации и снижению потерь на переключение, общий КПД двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя превышает 90 % в широком диапазоне нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана и верифицирована методика проектирования высокоэффективного двухтрансформаторного резонансного DC/DC-преобразователя. Основным результатом исследования стало доказательство того, что оптимальный выбор коэффициента трансформации $k = 0,5$ позволяет радикально расширить диапазон нагрузок, при которых сохраняется мягкая коммутация всех силовых ключей. Это преимущество наглядно продемонстрировано на карте режимов ZVS, где рабочая точка предложенного преоб-

разователя даже при полной нагрузке остается вне области потери мягкой коммутации, в отличие от традиционной топологии с $k = 1,0$. Экспериментальные исследования подтвердили высокую сходимость с теоретическими расчетами: среднеквадратичные значения резонансных токов отличаются не более чем на 5 % от прогнозируемых величин, а осциллограммы однозначно свидетельствуют о выполнении условий ZVS во всем диапазоне нагрузок. Практическая значимость разработанной методики подтверждена достижением КПД свыше 96 % в рабочем диапазоне мощностей, что превосходит показатели традиционных резонансных и мостовых топологий. Таким образом, предложенный подход к проектированию двухтрансформаторного преобразователя открывает новые возможности для создания компактных и высокоэффективных систем преобразования энергии для современных применений в области электротранспорта и интеллектуальных энергетических систем.

Список источников

1. Wu J., Li X., Zhou S. et al. Constant-current, constant-voltage operation of a dual-bridge resonant converter: Modulation, design and experimental results // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 24.
2. Gunawardena P., Nayanasiri D., Hou N. et al. A soft-switched current-fed dual-input isolated DC-DC converter topology // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 70, no. 5. P. 4842–4853.
3. Пирогов А. А., Хорошайлова М. В., Назаренко Н. Г. и др. Анализ обеспечения целостности сигнала на печатной плате при проектировании высокопроизводительных вычислительных устройств. Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 2. С. 47–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-6>.
4. Хорошайлова М. В., Пирогов А. А., Демикхова А. С. Схема выпрямителя для динамического улучшения эффективности преобразования мощности в системах сбора внешней радиочастотной энергии // *Энергетика, информатика, инновации – 2024 : труды участников XIV Международной научно-технической конференции, Смоленск, 13–14 ноября 2024 г. Смоленск: Универсум, 2024. С. 115–119.*
5. Wei Y., Luo Q., Mantooth A. Hybrid control strategy for LLC converter with reduced switching frequency range and circulating current for hold-up time operation // *IEEE Transactions Power Electronics*. 2021. Vol. 36, no. 8. P. 8600–8606.
6. Shi Z., Tang Y., Guo Y. et al. Optimal design method of LLC half-bridge resonant converter considering backflow power analysis // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69, no. 4. P. 3599–3608.
7. Lin J.-Y., Yueh H.-Y., Lin Y.-F. et al. Variable-frequency and phase-shift with synchronous rectification advance on-time hybrid control of LLC resonant converter for electric vehicles charger // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 348–356.

Информация об авторах

А. А. Пирогов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>,
Pirogov.alx@gmail.com

М. В. Хорошайлова – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>,
pmv2205@mail.ru

П. В. Зобов – преподаватель;

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>,
semka_elya@mail.ru✉

References

1. Wu J., Li X., Zhou S. et al. Constant-current, constant-voltage operation of a dual-bridge resonant converter: Modulation, design and experimental results. *Applied Sciences*. 2021;11(24).
2. Gunawardena P., Nayanasiri D., Hou N. et al. A soft-switched current-fed dual-input isolated DC-DC converter topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;70(5):4842–4853.
3. Pirogov A. A., Khoroshailova M. V., Nazarenko N. G. et al. Signal integrity control analysis on printed circuit board in design of high-performance computing devices. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(2):47–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-6>. (In Russ.).
4. Khoroshailova M. V., Pirogov A. A., Demikhova A. S. Skhema vypryamitelya dlya dinamicheskogo uluchsheniya effektivnosti preobrazovaniya moshchnosti v sistemakh sbora vneshney radiochastotnoy energii. In: *Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference “Energetika, informatika, innovatsii – 2024”*, November 13–14, 2024, Smolensk. Smolensk: Universum; 2024. p. 115–119. (In Russ.).
5. Wei Y., Luo Q., Mantooth A. Hybrid control strategy for LLC converter with reduced switching frequency range and circulating current for hold-up time operation. *IEEE Transactions Power Electronics*. 2021;36(8):8600–8606.
6. Shi Z., Tang Y., Guo Y. et al. Optimal design method of LLC half-bridge resonant converter considering backflow power analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;69(4):3599–3608.
7. Lin J.-Y., Yueh H.-Y., Lin Y.-F. et al. Variable-frequency and phase-shift with synchronous rectification advance on-time hybrid control of LLC resonant converter for electric vehicles charger. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*. 2023;4(1):348–356.

About the authors

A. A. Pirogov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>,
Pirogov.alx@gmail.com

M. V. Khoroshailova – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>,
pmv2205@mail.ru

P. V. Zobov – Lecturer;

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>,
semka_elya@mail.ru✉

Научная статья

УДК 001.891:303.443.2:004.94+530.1

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-4>



Численные методы теории перколяции при анализе проявления связности в сетях знаний

Олег Русланович Попов^{1✉}, Сергей Олегович Крамаров², Елена Владимировна Гребенюк²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

²Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. Моделируем динамику изменения связности в нерегулярных сетевых структурах, основываясь на теории перколяции. В качестве реальной «сети знаний» анализируем растущую сеть цитирования научных публикаций, структурированных на основе произведенной в базе данных arXiv выборки, связанной со «второй суперструнной революцией» в области теоретической физики высоких энергий (НЕР). Выбранный инструментальный численного моделирования позволяет подробно изучить процесс кластеризации сетей и значения макроскопических величин вблизи порога перколяции. Установлено, что с ростом средней степени сети коррелирует увеличение величины порога перколяции, достигая величины насыщения (в интервале 0,65–0,70 для задачи узлов), а также увеличивается средний размер кластера. Скорость роста кластеризации узлов наиболее сильно возрастает в области значений вероятности исключения единичных узлов от 0,5 до 0,8. В сравнении с перколяционными процессами, кластеризация в растущей сети знаний более чувствительна к изменению плотности ее связей.

Ключевые слова: сеть знаний, сеть цитирования, сеть, физика высоких энергий, НЕР, перколяция, перколяционный переход, связность, гигантский компонент, кластеризация

Для цитирования: Попов О. Р., Крамаров С. О., Гребенюк Е. В. Численные методы теории перколяции при анализе проявления связности в сетях знаний // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 39–48. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-4>.

Original article

Numerical simulation of percolation theory in connectivity analysis of knowledge networks

Oleg R. Popov^{1✉}, Sergey O. Kramarov², Elena V. Grebenyuk²

¹National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia

²Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The paper models the dynamics of connectivity change in irregular networks using percolation theory. The article analyzes an existent knowledge network, i.e. citation system for scientific publications based on a sample from the arXiv database related to the “second superstring revolution” in high-energy physics (HEP). The selected numerical modeling method enables a closer study of the network clustering and the macroscopic quantities’ values near the percolation threshold. The work demonstrates that the percolation threshold increases with the average network degree, reaching a saturation value of 0.65–0.70 in the node problem. Moreover, the average cluster size also increases. The growth rate of node clustering peaks in the range from 0.5 to 0.8 considering a single node omission probability. The results reveal that clustering in an expanding knowledge network is more sensitive to changes in the connection density compared to percolation processes.

Keywords: knowledge network, citation network, network, high-energy physics, HEP, percolation, percolation transition, connectivity, giant component, clustering

For citation: Popov O. R., Kramarov S. O., Grebenyuk E. V. Numerical simulation of percolation theory in connectivity analysis of knowledge networks. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):39–48. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-4>.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие Индустрии 4.0 подразумевает цифровизацию производства [1], а также широкое применение интеллектуальных систем и математических моделей [2] для оптимизации и повышения эффективности задач управления в динамике сложных социотехнических систем (СТС), критически зависящих от потоков информации и данных. Перколяция (percolare, или протекание в переводе с латинского), в ее наиболее общей интерпретации, относится к «потоку» чего-либо (физического носителя, данных или информации) в случайных, как правило, сетевых структурах, сопровождаемому некоторыми нелинейными динамическими процессами в узлах сети. Возникнув в области статистической и материальной физики, с точки зрения гетерогенных моделей взаимодействия компонентов, составляющих сложные СТС, она имеет множество приложений в социологии, биологии, эпидемиологии [3], а также в информатике и компьютерных науках [4].

Математическим предметом она начинается с классической работы Бродбента и Хаммерсли в 1957 году [5], в которой были введены его название, а также геометрические и вероятностные понятия.

В течение последних десятилетий перколяционное моделирование широкого класса так называемых критических явлений показало их универсальность с математической точки зрения [6]. Оказалось, что процессы различной природы, такие как проникновение жидкости или газа внутрь пористого камня, распространение эпидемий или информации в социальной сети, математическим образом сходятся в аддитивную компоненту [7, 8].

Перколяция в социальных сетях при анализе сетей знаний, или информационная перколяция – актуальное, популярное и развивающееся направление на стыке научных концепций. Рассматривались вопросы моде-

лирования реальной перколяции и фазовых переходов в сложных социотехнических сетевых структурах: в коэволюции между структурой сети и уровнем активности пользователя [9], с учетом самоорганизации и наличия памяти [10], в распределенных системах различных сетей для анализа распространения эпидемий и связанной с ними информации [11], в нейронных сетях с динамически изменяемой функциональной связностью [12].

В меньшей степени представлены проблемы моделирования динамики сложных СТС, в которых происходит трансформация потоков информации, когда через формирование критически связанных кластеров она становится знанием (проектирование новых систем образования, выявление скрытых паттернов в данных, оптимизация приложений наукометрии для прогноза прорывных научных направлений).

Наш подход основан на рассмотрении сетей знаний как перколяционных систем, в которых:

- узлами выступают отдельные идеи, термины, данные, публикации, исследователи, институты;
 - связи представляют собой логические зависимости, цитирования, семантические ассоциации;
 - перколяционный переход – это возникновение гигантского кластера взаимосвязанных знаний, который становится основой для новых открытий или парадигм.
- Феномен, где информация становится знанием через формирование критически связанных кластеров, объединяет сетевую физику, теорию информации и когнитивные науки, и в развитии на стыке наук [7] это важно:
- с точки зрения гетерогенных моделей взаимодействия компонентов, составляющих сложные сетевые системы;
 - как парадигма случайной и полуслучайной связности компонентов сетевых систем;

– как анализ методов, осуществляющих фильтрацию, структурирование и интеграцию данных;

– как изучение механизмов, отражающих физическую природу информации и ее трансформацию в системах, где связи между элементами играют ключевую роль.

Цель работы – осуществить проверку гипотезы перколяционной трансформации информации с помощью численных методов, основанных на применении теории перколяции к динамическим информационным процессам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теория перколяции и формирование геометрической связности: информационный подход.

Перколяция часто рассматривается на геометрических структурах (дискретных решетчатых моделях, случайных графах, фрактальных самоподобных геометриях) и развивается на уровне подходов к описанию сложных объектов, основанных на геометрических понятиях.

Так, в физике твердого тела «в рамках перколяционного представления формирование микроструктур сегнетокерамики есть серия геометрических фазовых переходов, происходящих на различных структурных уровнях, которые могут быть описаны как появление соединяющих кластеров в соответствующих перколяционных решетках» [13].

В основном теория касается существования так называемого перколяционного (percolating), бесконечного (infinity) или соединяющего (connecting) кластера (P_∞ , БК) и его структуры по отношению к вероятности заполнения p . Вероятность p здесь можно интерпретировать как долю (концентрацию) занятых узлов при случайно-однородном заполнении решетки.

Для характеристики этого явления принимают размер гигантского скопления S , который определяется как:

$$S = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_1}{N},$$

где N – размер системы (общее количество узлов); S_1 – количество узлов в самом большом кластере.

В отличие от термического или магнитного фазовых переходов, перколяционный переход (ПП) – это изменение топологии системы: от изолированных кластеров к глобально связанной сети [14]. В случайной геометрической структуре фазовый переход возникает из-за изменения связности и характеризуется структурными свойствами кластеров вблизи критической вероятности p_c .

Поскольку перколяция связана с кластеризацией, следовательно, параметризация распределения кластеров играет центральную роль в описании теории перколяции. Функция распределения размеров кластеров $n_s(p)$ определяется как среднее число кластеров размера s на узел, нормированное на полное число узлов. В терминах $n_s(p)$ можно определить P_s как вероятность того, что произвольный занятый узел принадлежит кластеру размера s :

$$P_s = \frac{s n_s(p)}{\sum_s n_s(p)}.$$

Средний размер кластера $S(p)$ тогда определяется как:

$$S(p) = \sum_s s P_s = \frac{\sum_s s^2 n_s(p)}{\sum_s s n_s(p)}.$$

Наш подход к описанию информационных процессов в сложных СТС может быть дополнен моделями, построенными на аналогии с некоторыми типами процессов, описывающих изменение фундаментальных свойств сетевой теории: связность, кластерность и перколяция.

В исследовании динамики формирования связей в терминологических сетях («сетях знаний»), составленных из предметной области библиографических выборок БД Scopus, показано [15, 16], что значимость сетевых показателей связности, определяющих степень передачи информации без потерь и искажений, очевидна.

Численное моделирование сетей цитирования, построенных на основе библиографической выборки в базе arXiv, показало, что

«в сети физики высоких энергий (НЕР) происходит перколяционный переход, индикатором которого является образование вблизи локальной критической точки гигантского компонента» [17].

Вычисление данных характеристик позволяет ответить на такие важные вопросы, как:

1. Какова общая доля узлов (связей) сети, исключение которых способно нарушить связность всей сети, достигая критического порога?

2. Как вероятность блокирования (исключения) одного узла сети влияет на значение и свойства различных макроскопических величин, как, например, средний размер кластера?

3. Какова структура перколяционного кластера, выявляемая через распределение кластеров исключенных узлов (связей) по размерам, и ряд других вопросов.

Квадратная сетка как часть упорядоченных и симметричных систем – это наиболее простая, но только одна из возможных абстрактных моделей. Сети, моделирующие реальные информационные объекты, обладают свойствами конечности и определенной хаотичности. Глобальная научная информационная система – это сложная, динамичная, абстрактная система.

Следует учитывать ее особенности:

1. Узлы представляют собой динамичные огромные объемы данных из множества источников (научные публикации, патенты, технические документы, финансовые отчеты, социальные сети, данные о продуктах и технологиях).

2. Контекстуализация связей между данными реализуется через семантический анализ, сетевой анализ, анализ цитирования, тематическое моделирование, анализ временных рядов.

Это создает постоянно обновляемую, структурированную модель сложной научной «сети знаний», отражающую ее текущее состояние и эволюцию. Если мы ставим задачу исследовать реальную сетевую структуру, то применение аналитических формул перколяционной теории может давать погрешность, и следует полагаться на численное моделирование.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Численное моделирование процесса блокировки и анализа связанных компонент

В качестве реальной «сети знаний» анализируем сеть цитирования статей по физике высоких энергий из базы данных arXiv с 1 августа 1991 г. по 12 мая 2003 г. Произведена выборка 27770 публикаций в разделе НЕР (“High Energy Physics – Theory”). Сеть цитирования представлена 352807 графами. Исходные данные для ЧМ заданы в работе [17]. В формате программного продукта Pajek исследованы общие сетевые параметры и показатели связности сетей цитирования НЕР в динамике, которые структурированы по временным кластерам с интервалом в 1 месяц. Предпосылками установленного перколяционного перехода в растущей сети НЕР является поведение компонентов сети (количества публикаций) и соединительных свойств сетей (ссылок) в динамике от небольших кластеров к большим связующим кластерам.

Универсальность перколяционных процессов открывает возможность использования при анализе динамики сетей знаний апробированные численные модели, описывающие изменение физических свойств среды: электрической проводимости [18], границы области коррозии [19], скорости разложения газогидрата [8]. Нами использовано специализированное программное обеспечение, разработанное специально для детального моделирования перколяционных процессов [20]. Инструментарий позволяет более подробно изучить процесс кластеризации сетей цитирования НЕР и значения макроскопических величин вблизи порога перколяции.

Для моделирования аналога информационной сети мы переходим от решеточной перколяции к перколяции в произвольных (случайных) сетях. Это классическая задача теории случайных графов и теории перколяции на графах.

Для произвольной сети (не обязательно решеточной) с заданным распределением степеней узлов (количества связей) мы можем использовать теорию случайных графов, чтобы найти порог перколяции.

Рассмотрим неориентированный граф с N узлами. Пусть узел имеет степень k (число связей) с вероятностью p_k . Средняя степень узла: $= \sum k p_k$.

Мы рассматриваем перколяцию узлов: каждый узел открыт (не блокирован) с вероятностью p (или, наоборот, блокирован с вероятностью $1 - p$). Нас интересует, при каком p возникает гигантская связная компонента (аналог бесконечного кластера).

В теории случайных графов используют следующую идею: гигантская компонента возникает, когда узел, достижимый по случайной связи, имеет в среднем хотя бы одну другую связь, ведущую к другим узлам, и так далее.

Реальная сеть имеет структуру, отличную от случайного графа (например, имеет кластеризацию, ассортативность и т. д.). Опишем краткий алгоритм численного моделирования для произвольной сети.

1. Построение исходной сети.

В качестве аналога информационной сети выбран тип «произвольные сети». Параметр «количество узлов в сети» зафиксирован на момент начала перколяции. Показатель «среднее число связей на один узел» k («степень сети») меняется в динамике, соответствуя данным, выбранным во временном интервале перколяционных процессов (январь 1994 – июль 1995 гг.) в [17].

2. Процедура блокировки.

Для заданной вероятности блокировки p (доля незаблокированных узлов) случайным образом блокируем (удаляем) долю $(1 - p)$ узлов. Все инцидентные связи также удаляются. Повторяем много реализаций (например, 1000).

3. Анализ связности.

Находим связные компоненты в оставшейся сети. Определяем размер наибольшей компоненты S_{max} (например, компоненты, размер которой превышает некоторый порог, например 5% от общего числа узлов). Оцениваем вероятность протекания P (наличие гигантской компоненты) как долю реализаций, в которых гигантская компонента возникла.

4. Определение порога перколяции.

Рассматриваем порог перколяции как долю $p_c = 1 - f_c$, $p_c = 1 - p$, где f_c – критическая вероятность блокировки, при которой:

$$\frac{S_{max}}{N} \rightarrow 0 \text{ при } N \rightarrow \infty.$$

Строим график вероятности протекания P от p и находим p_c как точку, где вероятность приближается к $1/2$, что является естественным следствием симметрии перколяционного перехода и свойств скейлинговой теории вблизи критической точки [21, с. 109]. Анализируем характер перколяции в зависимости от степени сети.

5. Анализ кластеризации.

Определяем средний размер кластера аналитическими методами. Моделируем зависимость средних размеров кластеров произвольной сети $S(p)$ от вероятности блокирования (исключения) узлов из сети p . Строим график зависимости S от p и фиксируем p как точку, где вероятность исключения равна 0,5, и экстраполируем участки данного пересечения на ось ординат. Анализируем характер кластеризации в зависимости от степени сети.

На рис. 1 показана зависимость вероятности P протекания произвольной сети от вероятности блокирования одного узла связи p . Кривые 1–6 построены для сетей, у которых среднее число связей находится в диапазоне $k = 1,65–9,99$. На данном графике интерпретируем значение порога перколяции p_c как экстраполяцию точек пересечения горизонтальной штриховой линии с кривыми 1–6 до пересечения с осью абсцисс.

Проанализируем, как значения величин порога перколяции p_c , полученные на основе заданного алгоритма, связаны с изменением среднего числа связей в данной сети. Зависимость, построенная по данной методике, представлена на рис. 2. В динамике роста среднего числа связей (в заданном диапазоне) пороги протекания достигают величины насыщения (в интервале 0,65–0,70) и затем в меньшей степени зависят от нее.

Проведенная аппроксимация позволяет получить линейную зависимость $y = 0,152 \ln(x) + 0,520$, которая коррелирует с результатами моделирования перколяции информации в сетях со случайной структурой [20].

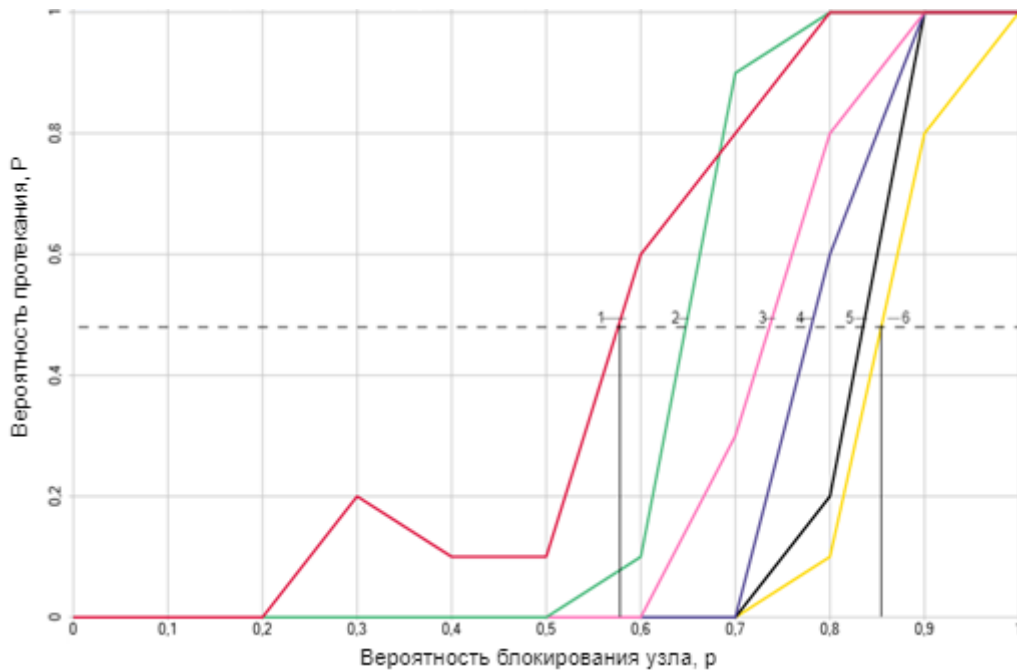


Рис. 1. Зависимость вероятности протекания P произвольной сети от вероятности блокирования одного узла связи p с различной степенью сети k (горизонтальная штриховая линия обозначает значение критической вероятности протекания равное 0.5): кривая 1 построена для сети, у которой $k = 1,65$; 2 – 2,44; 3 – 3,47; 4 – 5,21; 5 – 8,31; 6 – 9,99

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

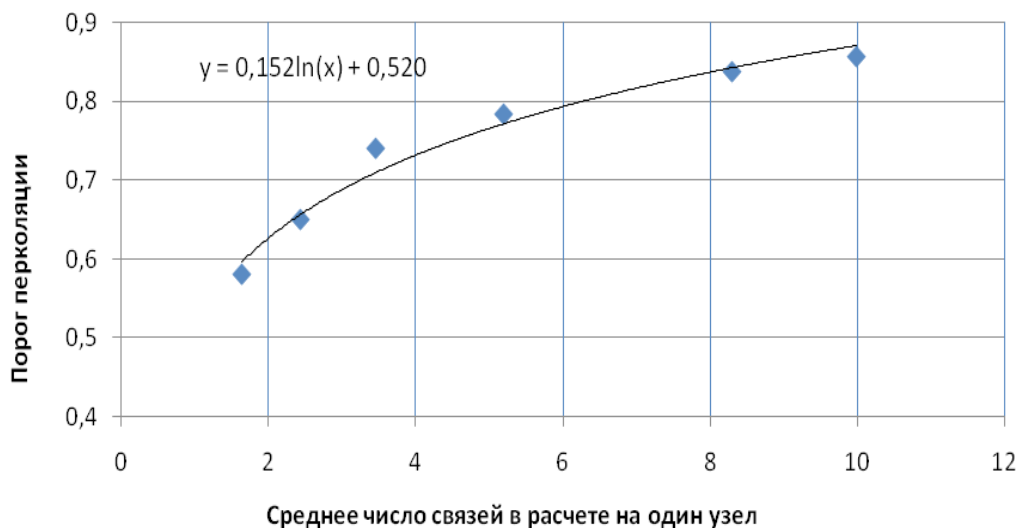


Рис. 2. Зависимость порога перколяции P_c произвольной сети от средней степени сети (в диапазоне $k = 1,65-9,99$)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Стохастический процесс формирования кластерности, являющийся индикатором концептуальных изменений в сетях цитирования, позволяет выявлять и связывать статьи в исследовательскую схему, представляющую связанные абстрактные концепции или фрагменты единых теорий. Выявляемая динамика среднего размера кластера является обобщенным показате-

лем скорости перехода от локальных понятий к достижению «критической массы» связей.

На рис. 3 выведена зависимость среднего размера кластера от вероятности исключения узлов произвольных сетей, у которых средняя степень сети находится в заданном диапазоне k (кривые 1–6). На графике видно, что в диапазоне вероятности блокировки единичных

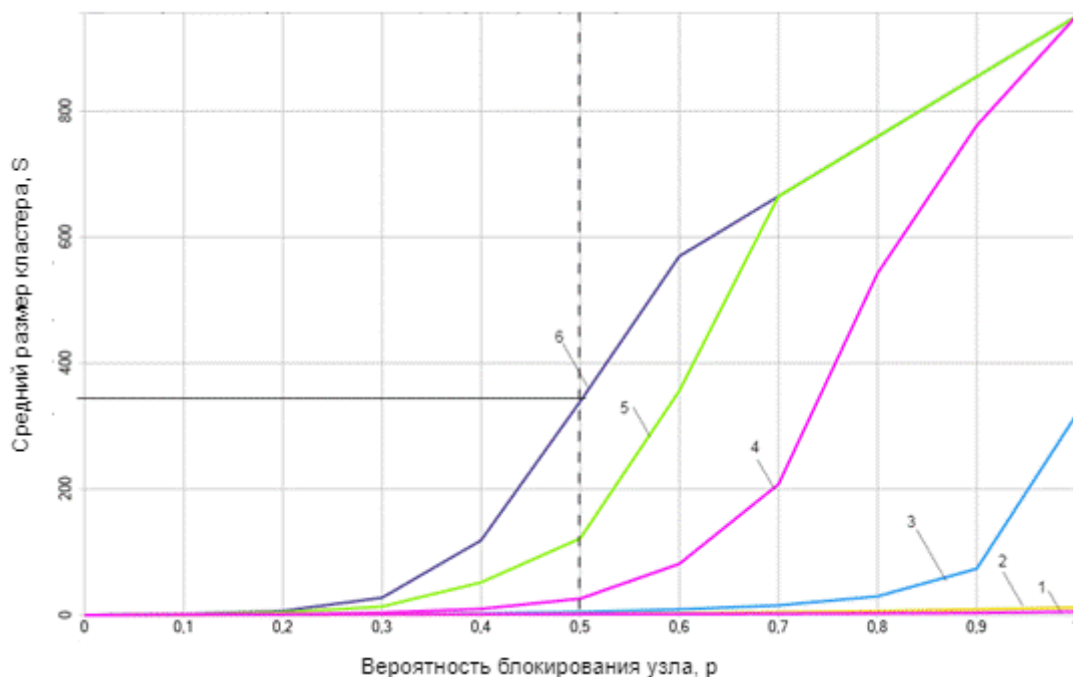


Рис. 3. Зависимость среднего размера кластера S произвольной сети от вероятности блокирования одного узла связи p с различной степенью сети k (вертикальная штриховая линия обозначает значение вероятности исключения, равное 0,5): кривая 1 построена для сети, у которой $k = 1,65$; 2 – 2,44; 3 – 3,47; 4 – 5,21; 5 – 8,31; 6 – 9,99

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

узлов 0,5–0,8 скорость роста кластеризации узлов отличается наибольшей динамикой.

Если зафиксировать вероятность исключения, равную 0,5, которая показана на рис. 3 вертикальной штриховой линией, и экстраполировать участки в центре кривых 1–6 до пересечения с осью ординат, то полученные значения величин показывают характер изменения среднего размера кластера в зависимости от степени сети.

Представленная на рис. 4 зависимость демонстрирует экспоненциальный характер, аппроксимация которой выражена уравнением $y = 0,614e^{0,642x}$, что характеризует высокую чувствительность процессов кластеризации в данной сети к изменению плотности ее связей.

Следует обратить внимание (рис. 3), что для произвольной решетки количество узлов в несвязанных областях (кластерах) перегруженных узлов начинает в среднем превышать 10 только после величины вероятности блокирования $p = 0,2$. Это зависит от среднего числа связей сети.

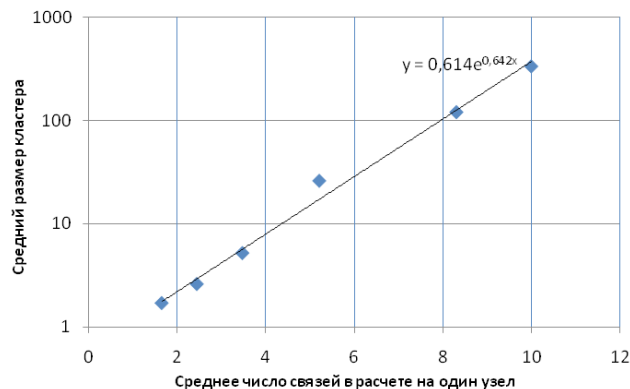


Рис. 4. Зависимость среднего размера кластера S произвольной сети от средней степени сети (в диапазоне $k = 1,65$ –9,99)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перколяционный переход, являясь индикатором внезапных концептуальных изменений в научных сетях цитирования, позволяет выявлять и связывать статьи в исследовательскую схему, составляющую кластер новых идей или теорий.

2. При моделировании перколяционных процессов в произвольных сетях, заданных

на основе параметров реальных информационных сетей цитирования научных публикаций, пороги протекания при возрастании плотности сети достигают величины насыщения (в интервале 0,65–0,70) и далее в меньшей степени зависят от нее.

3. Моделирование динамики кластеризации связанных исключенных узлов производственных сетей, у которых средняя степень сети находится в диапазоне $k = 1,65\text{--}9,99$, показало, что в диапазоне вероятности блокировки единичных узлов 0,5–0,8 скорость роста кластеризации узлов отличается наибольшей динамикой.

4. Зависимость между средней степенью сети и средним размером кластера носит экспоненциальный характер, а между плотно-

стью и порогом перколяции – логарифмический, то есть процессы кластеризации в сети более чувствительны к изменению ее плотности ее связей, чем перколяционные, являющиеся следствием обширного накопления локальных кластеров, многие из которых сливаются в один бесконечный кластер.

5. Результаты исследования могут дополнить и расширить нашу концепцию сетевой модели наукометрической информации, развиваемую на основе методов прикладной информатики, когнитивной науки и машинного обучения, для решения прикладных задач (проектирование учебных курсов как «сетей перколяции», построение интеллектуальных технологических платформ, выявление трендовых направлений научного знания).

Список источников

1. Дерябин С. А., Кондратьев Е. И., Рзазаде Ульви Азар оглы и др. Язык моделирования архитектуры цифрового предприятия: методологический подход к проектированию систем Индустрии 4.0 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 97–110. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_97.
2. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 16. <https://doi.org/10.3390/math10162959>.
3. Brunk N. E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles // *ACS Nano*. 2021. Vol. 15, no. 8. P. 12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>.
4. Лесько С. А., Алёшкин А. С., Филатов В. В. Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов // *Russian Technological Journal*. 2019. Т. 7, № 3. С. 7–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27>.
5. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes // *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1957. Vol. 53, no. 3. P. 629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>.
6. Kesten H. What is... percolation? // *Notices of the American Mathematical Society*. 2006. Vol. 53, no. 5. P. 572–573.
7. Li M., Liu R.-R., Lü L. et al. Percolation on complex networks: Theory and application // *Physics Reports*. 2021. Vol. 907. P. 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>.

References

1. Deryabin S. A., Kondratyev E. I., Rzaade Ulvi Azar ogly et al. Digital mine architecture modeling language: Methodological approach to design in Industry 4.0. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):97–110. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_97. (In Russ.).
2. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data. *Mathematics*. 2022;10(16). <https://doi.org/10.3390/math10162959>.
3. Brunk N. E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles. *ACS Nano*. 2021;15(8):12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>.
4. Lesko S. A., Alyoshkin A. S., Filatov V. V. Stochastic and percolating models of blocking computer networks dynamics during distribution of epidemics of evolutionary computer viruses. *Russian Technological Journal*. 2019;7(3):7–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27>. (In Russ.).
5. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1957;53(3):629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>.
6. Kesten H. What is... percolation? *Notices of the American Mathematical Society*. 2006;53(5):572–573.
7. Li M., Liu R.-R., Lü L. et al. Percolation on complex networks: Theory and application. *Physics Reports*. 2021;907:1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>.
8. Petrov E. A., Dzhariev I. E., Popov O. R. et al. An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect

8. Петров Е. А., Джариев И. Э., Попов О. Р. и др. Подход к прогнозированию универсальных динамических процессов на примере моделирования электромагнитного воздействия на газогидратные пласты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 6. С. 56–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_56.
9. Xie J., Meng F., Sun J. et al. Detecting and modelling real percolation and phase transitions of information on social media // *Nature Human Behaviour*. 2021. Vol. 5. P. 1161–1168. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01090-z>.
10. Жуков Д. О., Хватова Т. Ю., Зальцман А. Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти // Информатика и ее применения. 2021. Т. 15, № 1. С. 102–110. <https://doi.org/10.14357/19922264210114>.
11. Bagnoli F., Bellini E., Massaro E. et al. Percolation and Internet science // *Future Internet*. 2019. Vol. 11, no. 2. P. 35. <https://doi.org/10.3390/fi11020035>.
12. Sun H., Radicchi F., Kurths J. et al. The dynamic nature of percolation on networks with triadic interactions // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37019-5>.
13. Дашко Ю. В. Перколяционное представление микроструктуры сегнетокерамики: дис. ... д-ра ф.-м. наук. Ростов-на-Дону, 1998. 402 с.
14. Mondal S., Pachhal S., Agarwala A. Percolation transition in a topological phase // *Physical Review B*. 2023. Vol. 108, no. 22. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.L220201>.
15. Крамаров С. О., Попов О. Р., Джариев И. Э. и др. Динамика формирования связей в сетях, структурированных на основе прогностических терминов // *Russian Technological Journal*. 2023. Т. 11, № 3. С. 17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>.
16. Абдуллаев А. М., Аверченко Е. В., Александрова Т. С. и др. Возможности сочетания естественного и искусственного интеллектов в образовательных системах : коллективная монография / под ред. С. О. Крамарова. Москва : РИОР, 2023. 232 с. <https://doi.org/10.29039/02124-8>.
17. Крамаров С. О., Попов О. Р., Джариев И. Э. и др. Перколяция и формирование связности в динамике сетей цитирования данных по физике высоких энергий // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13, № 1. С. 16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-16-27>.
18. Сизин П. Е. Теоретическое и численное моделирование электрической проводимости пористых сред // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5. С. 43–56. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_43.
19. Карачун И. А., Кравченя П. Д., Медников С. В. и др. Моделирование коррозии полимеров в агрессивных on gas-hydrate strata. *MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(6):56–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_56. (In Russ.).
9. Xie J., Meng F., Sun J. et al. Detecting and modelling real percolation and phase transitions of information on social media. *Nature Human Behaviour*. 2021;5:1161–1168. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01090-z>.
10. Zhukov D. O., Khvatova T. Yu., Zaltzman A. D. Modeling of the stochastic dynamics of changes in node states and percolation transitions in social networks with self-organization and memory. *Informatics and its applications*. 2021;15(1):102–110. <https://doi.org/10.14357/19922264210114>. (In Russ.).
11. Bagnoli F., Bellini E., Massaro E. et al. Percolation and Internet science. *Future Internet*. 2019;11(2):35. <https://doi.org/10.3390/fi11020035>.
12. Sun H., Radicchi F., Kurths J. et al. The dynamic nature of percolation on networks with triadic interactions. *Nature Communications*. 2023;14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37019-5>.
13. Dashko Yu. V. Perkolyatsionnoe predstavlenie mikrostruktury segnetokeramiki. Doctoral Thesis. Rostov-on-Don; 1998. 402 p. (In Russ.).
14. Mondal S., Pachhal S., Agarwala A. Percolation transition in a topological phase. *Physical Review B*. 2023;108(22). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.L220201>.
15. Kramarov S. O., Popov O. R., Dzhariev I. E. et al. Dynamics of link formation in networks structured on the basis of predictive terms. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>. (In Russ.).
16. Abdullaev A. M., Averchenko E. V., Aleksandrova T. S. et al. Vozmozhnosti sochetaniya estestvennogo i iskustvennogo intellektov v obrazovatelnykh sistemakh. Joint Monograph. Kramarov S. O., ed. Moscow: RIOR Publishing Center; 2023. 232 p. <https://doi.org/10.29039/02124-8>. (In Russ.).
17. Kramarov S. O., Popov O. R., Dzhariev I. E. et al. Percolation and connectivity formation in the dynamics of data citation networks in high energy physics. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-16-27>. (In Russ.).
18. Sizin P. E. Theoretical and numerical modeling of electric conductance in porous media. *MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(5):43–56. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_43. (In Russ.).
19. Karachun I. A., Kravchenya P. D., Mednikov S. V. et al. Simulation of polymer corrosion in aggressive environments based on percolation theory. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2020;(12):335–346. (In Russ.).
20. Zhukov D. O., Khvatova T. Yu., Lesko S. A. et al. The influence of the connections' density on clusterization and percolation threshold during information distribution in social networks. *Informatics and Applications*. 2018;12(2):90–97. <https://doi.org/10.14357/19922264180213>. (In Russ.).

- средах на основе теории перколяции // Инженерный вестник Дона. 2020. № 12 (72). С. 335–346.
20. Жуков Д. О., Хватова Т. Ю., Лесько С. А. Влияние плотности связей на кластеризацию и порог перколяции при распространении информации в социальных сетях // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12, № 2. С. 90–97. <https://doi.org/10.14357/19922264180213>.
21. Fractals and disordered systems / Bunde A., Havlin S., eds. 2nd rev. ed. Berlin, Heidelberg : Springer Science+Business Media, 2012. 408 p.

Информация об авторах

О. Р. Попов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-6209-3554>,
cs41825@aaanet.ru✉

С. О. Крамаров – профессор;
<https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>,
maoovo@yandex.ru

Е. В. Гребенюк – старший преподаватель;
<https://orcid.org/0000-0002-3234-6650>,
pev_86@mail.ru

About the authors

O. R. Popov – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent;

<https://orcid.org/0000-0001-6209-3554>,
cs41825@aaanet.ru✉

S. O. Kramarov – Professor;
<https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>,
maoovo@yandex.ru

E. V. Grebenyuk – Senior Lecturer;
<https://orcid.org/0000-0002-3234-6650>,
pev_86@mail.ru

Научная статья

УДК 004.9+629.73:005.591.6

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-5>

Управление портфелями патентных прав в организациях авиационной промышленности

Сергей Игоревич Прудников*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В статье представлен алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав на основе методов генетического программирования и роя частиц. Алгоритм позволяет выбирать метод оптимизации в зависимости от структурированности данных, требуемой интерпретируемости результатов, доступных ресурсов и размера задачи. Метод генетического программирования рекомендуется для стратегических задач с небольшими портфелями, где важна объяснимость решений, а метод роя частиц применим для быстрой оптимизации крупных портфелей. На примерах из области авиационной техники продемонстрирована эффективность алгоритма, подтвержденная решением реальных задач с использованием авторского программного обеспечения.

Ключевые слова: авиационная промышленность, управление инновациями, интеллектуальная собственность, результаты интеллектуальной деятельности, генетическое программирование, метод роя частиц

Для цитирования: Прудников С. И. Управление портфелями патентных прав в организациях авиационной промышленности // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 49–63. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-5>.

Original article

Patent portfolio management in aviation industry companies

Sergey I. Prudnikov*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*

Abstract. This article presents an algorithm for generating and improving patent portfolios via genetic programming and particle swarm optimization. The specified algorithm enables selection of an optimization method according to the following parameters: data organization, expected results interpretability, resources availability, and task size. The study defines genetic programming as a recommended method for small portfolios in solving strategic tasks that require solution interpretability, while particle swarm optimization as applicable practice for rapid optimization of large portfolios. The author demonstrates the algorithm's efficiency in aircraft engineering by addressing existent problems using self-created software.

Keywords: aviation industry, innovation management, intellectual property, intellectual property asset, genetic programming, particle swarm optimization

For citation: Prudnikov S. I. Patent portfolio management in aviation industry companies. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):49–63. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-5>.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационная промышленность является одной из наиболее технологически развитых и капиталоемких отраслей современной эконо-

мики, где конкурентные преимущества и долгосрочная устойчивость организаций в значительной степени определяются качеством управления результатами интеллектуальной

деятельности (РИД). В условиях глобальной геополитической конкуренции и санкционного давления эффективное формирование портфелей патентных прав превращается в инструмент стратегического развития предприятий авиационной промышленности, что способствует достижению целей и решению задач обеспечения национальной безопасности [1].

Высокая технологичность авиастроения, характеризующаяся длинными циклами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), сложностью разрабатываемой продукции (двигатели, авионика, композитные материалы, системы управления) и жесткими требованиями к безопасности, предъявляет особые требования к управлению интеллектуальной собственностью (ИС) [2]. Также портфель патентных прав в авиационной сфере становится основой для развития смежных отраслей, способствует созданию технологических альянсов, а также является важным активом при привлечении финансирования, в том числе в рамках государственных программ [3].

Кроме того, требования законодательства в области импортозамещения и обеспечения технологической независимости оборонно-промышленного комплекса добавляют портфельному управлению интеллектуальными правами дополнительный критерий – соответствие национальным приоритетам и программам развития.

Исследования вопросов коммерциализации РИД нашли широкое отражение в работах отечественных авторов [4–6]. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что ключевой вектор исследований вопросов коммерциализации объектов ИС направлен на решение проблем экономического и правового характера. При этом традиционные подходы к управлению портфелями патентов и иных РИД, основанные на эвристических и экспертных оценках, становятся недостаточными в условиях экспоненциального роста объемов данных, увеличения сложности технологических взаимосвязей и необходимости учета множества противоречивых све-

дений, поступающих из разнородных источников в рамках коопераций исполнителей НИОКР [7]. Внедрение формальных математических методов оптимизации позволяет перейти от субъективных решений к обоснованным, воспроизводимым и адаптивным стратегиям управления патентными портфелями, обеспечивая повышение эффективности использования финансовых средств и усиление позиций государства в глобальной технологической конкуренции.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных подходов к формированию и оптимизации портфелей патентных прав в организациях авиационной промышленности России. Эти подходы должны комплексно учитывать отраслевую специфику высокотехнологичного производства, динамику глобальной патентной среды и императивы национальной политики в сфере технологического развития.

В исследовании для упрощения понимания базовых технических процессов формирования и оптимизации портфелей патентных прав под РИД, ИС и объектами ИС будут пониматься патенты на изобретения, полезные модели и промышленные образцы, которым предоставляется правовая охрана.

Объектом исследования являются процессы формирования и оптимизации портфелей патентных прав в организациях авиационной промышленности. Предмет исследования – алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав на основе методов генетического программирования (МГП) и роя частиц (МРЧ).

Целью исследования является повышение эффективности распоряжения правами на РИД в организациях авиационной промышленности за счет повышения качества формирования и оптимизации портфелей патентных прав с учетом заданных ограничений по доходности, риску, диверсификации и бюджету [8].

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Осуществить формальную постановку задачи;

2. Обосновать выбор метода оптимизации;
3. Разработать и обосновать алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав;
4. Рассмотреть и проанализировать примеры практического применения алгоритма формирования и оптимизации портфелей патентных прав для подтверждения его эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Формализованная постановка задачи

Пусть цель оптимизации портфеля патентных прав заключается в повышении обоснованности выбора оптимального набора РИД (P) и формировании на их основе портфеля для предоставления права их использования из множества:

$$P = p_1, p_2, \dots, p_n, \quad (1)$$

где $n \in \mathbb{N}^+$ – множество РИД, правообладателем которых является организация (размер задачи).

При этом каждый РИД p_i описывается вектором атрибутов:

$$p_i = \langle c_p, r_p, t_p, \sigma_p, \rho_p, k_i \rangle, \quad (2)$$

где $c_i \in \mathbb{R}^+$ – годовая стоимость поддержания в силе (руб./год);

$r_i \in \mathbb{R}^+$ – ожидаемый годовой доход (руб./год);

t_i – остаточный срок действия (лет);

$\sigma_i \in [0, 1]$ – волатильность (стандартное отклонение) доходности;

$\rho_i \in [0, 1]$ – уровень правового риска, устанавливаемый на основании экспертных оценок;

$k_i \in \{1, 2, \dots, K\}$ – индекс технологической области по заданному классификатору.

В рамках дальнейшего исследования высокое значение имеет матрица ковариаций доходности патентов:

$$\Sigma = [\sigma_{ij}]_{n \times n}, \quad i, j = 1, \dots, n, \\ \sigma_{ij} = \text{Cov}(r_i, r_j) = \mathbb{E}[(r_i - \mu_i)(r_j - \mu_j)], \quad (3)$$

где r_i, r_j – случайные величины доходностей i -го и j -го патентов;

$\mu_i = \mathbb{E}[r_i]$ – математическое ожидание доходности i -го патента;

$\mu_j = \mathbb{E}[r_j]$ – математическое ожидание доходности j -го патента;

$\mathbb{E}[\cdot]$ – оператор математического ожидания.

Представленная матрица применяется в алгоритме для расчета системного (ковариационного) риска портфеля $\sigma_p(x)$, коэффициента связанности патентов (κ), а также для оценивания эффекта диверсификации в стратегиях управления портфелями прав на РИД.

Для формирования целевой функции оптимизации $F(x)$ для решаемой задачи зададим формальное представление ее ключевых компонентов в соответствии с портфельной теорией Марковица [8]: доходность портфеля $V_D(x)$, уровень риска портфеля $V_R(x)$, диверсификация портфеля $V_{\text{Div}}(x)$, штрафные функции $P(x)$ за нарушение ограничений по каждому из компонентов.

С учетом вышеизложенного доходность портфеля $V_D(x)$ определяется в соответствии с формулой:

$$V_D(x) = \alpha \sum_{i=1}^n x_i (r_i - c_i) t_i, \quad (4)$$

где $\alpha \in [0, 1]$ – весовой коэффициент, определяющий важность доходности портфеля по сравнению с другими критериями при формировании портфеля прав.

Важным элементом для целевой функции является риск портфеля $V_R(x)$, который должен учитывать не только индивидуальные риски, присущие каждому РИД в портфеле (технологические, правовые, рыночные), но и системный риск, который обусловлен макроэкономическими факторами (отраслевыми, геополитическими, регуляторными), влияющими на весь портфель в целом [8]. В таком случае риск портфеля $V_R(x)$ определяется в соответствии с формулой:

$$V_R(x) = \beta \left[\omega_1 \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i t_i + \omega_2 \sqrt{x^T \Sigma x} \right], \quad (5)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор долей каждого РИД в портфеле;

$\beta \in [0, 1]$ – весовой коэффициент, определяющий важность учета рисков портфеля по

сравнению с другими критериями при формировании портфеля прав;

$\omega_1 \in [0,1]$ – весовой коэффициент, балансирующий вклад индивидуальных рисков РИД в общую оценку риска портфеля патентных прав;

$\omega_2 \in [0,1]$ – весовой коэффициент балансирующий вклад системного риска в общую оценку риска портфеля патентных прав при условии, что $\omega_1 + \omega_2 = 1$.

Таким образом, в целевой функции риск портфеля моделируется как взвешенная сумма двух компонентов. Первый компонент учитывает индивидуальные риски каждого РИД через сумму их волатильностей, скорректированных на срок действия, а второй компонент учитывает системный риск через квадратичную форму с матрицей ковариаций доходностей, что отражает взаимное влияние патентов в портфеле. Соотношение между этими компонентами регулируется весовыми коэффициентами, позволяя адаптировать модель к отраслевой специфике и степени корреляции технологий.

Для расчета уровня диверсификации портфеля $V_{Div}(x)$ применяется выражение:

$$V_{Div}(x) = \gamma \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\frac{n_k(x)}{|S(x)|} \right)^2 \right), \quad (6)$$

где $n_k(x)$ – количество патентов в технологической области k ;

$\gamma \in [0,1]$ – весовой коэффициент, определяющий важность диверсификации по сравнению с другими критериями при формировании портфеля прав;

$|S(x)|$ – установленный размер портфеля прав.

При этом ограничением при установлении того или иного весового коэффициента является: $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Функция штрафа за нарушение установленных ограничений включает следующие компоненты:

1. Штраф за нарушение установленного бюджета $P_1(x)$ определяется в соответствии с формулой:

$$P_1(x) = \lambda_1 \cdot \max \left(0, \sum_{i=1}^n x_i c_i t_i - B \right)^2 \quad (7)$$

при установленных ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n x_i c_i t_i \leq B, \quad (8)$$

где $\lambda_1 \in \mathbb{R}^+$ – коэффициент штрафа за превышение бюджета;

$B \in \mathbb{R}^+$ – бюджет на поддержание РИД в силе.

2. Штраф за нарушение установленного уровня риска $P_2(x)$ определяется в соответствии с формулой:

$$P_2(x) = \lambda_2 \cdot \max \left(0, \sum_{i=1}^n x_i \rho_i - R_{max} \right)^2 \quad (9)$$

при установленных ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n x_i \rho_i \leq R_{max}, \quad (10)$$

где $\lambda_2 \in \mathbb{R}^+$ – коэффициент штрафа за превышение уровня риска портфеля;

R_{max} – максимально допустимый уровень риска портфеля.

3. Штраф за превышение установленного размера портфеля прав $P_3(x)$ имеет вид:

$$P_3(x) = \lambda_3 \left[\max \left(0, |S(x)| - L_{max} \right)^2 + \max \left(0, L_{min} - |S(x)| \right)^2 \right] \quad (11)$$

при установленных ограничениях:

$$L_{min} \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq L_{max}, \quad (12)$$

где $\lambda_3 \in \mathbb{R}^+$ – коэффициент штрафа за превышение установленного максимально допустимого размера портфеля;

$L_{min}, L_{max} \in \mathbb{N}^+$ – установленные границы размера портфеля в зависимости от задачи.

4. Штраф за нарушение установленного уровня диверсификации портфеля $P_4(x)$ определяется в соответствии с выражением:

$$P_4(x) = \lambda_4 \sum_{k=1}^K \max \left(0, \left(\frac{n_k(x)}{|S(x)|} \right) - D_{max} \right)^2 \quad (13)$$

при установленных ограничениях:

$$\frac{n_k(x)}{|S(x)|} \leq D_{\max} \forall k \in 1, \dots, K, \quad (14)$$

где $\lambda_4 \in \mathbb{R}^+$ – коэффициент штрафа за нарушение уровня диверсификации портфеля;

$D_{\max} \in \left[\frac{1}{K}, 1 \right]$ – максимальная доля РИД одной технологической области в портфеле.

В зависимости от условий обстановки, а также задач и функций, определяющих порядок управления правами на РИД, весовые коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, \omega_1, \omega_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, определяющие приоритеты лиц, принимающих решения (ЛПР), могут быть заданы на основе экспертных методов, ретроспективной информации или с использованием методов машинного обучения [9, 10].

В общем виде портфель S представляет собой подмножество патентов $S \subseteq P$, при этом бинарная переменная отбора РИД в портфель имеет вид:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in S \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \forall i = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Вектор бинарных переменных решения x можно представить как:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \{0, 1\}^n, \quad (16)$$

Таким образом портфель прав на РИД можно представить выражением:

$$S(x) = \{p_i \in P | x_i = 1\} \subseteq P. \quad (17)$$

С учетом этого целевая функция может быть представлена следующим образом:

$$F(x) = \left[-V_D(x) + V_R(x) - V_{\text{Div}}(x) + \sum_{m=1}^4 P_m(x) \right] \rightarrow \min_{x \in \{0, 1\}^n}. \quad (18)$$

Дальнейшая работа в рамках исследования сводится к выбору конкретного метода оптимизации портфелей патентных прав ($M \in \{\text{МГП, МРЧ}\}$) на основе установленных базовых критериев.

2. Обоснование выбора метода оптимизации

Ключевыми критериями [11] выбора метода оптимизации для решаемой задачи являются:

- уровень структурированность патентных данных S_{str} ;
- требуемая интерпретируемость результатов I ;
- оценка ресурсов для решения задачи S_{res} ;
- размер задачи S_{size} .

На основании этого представим функцию оценки применимости МГП как:

$$\Phi_{\text{МГП}} = w_1 \cdot S_{\text{str}} + w_2 \cdot I + w_3 \cdot S_{\text{res}} + w_4 \cdot S_{\text{size}}(n), \quad (19)$$

где значимости критериев выбора метода оптимизации определены на основе проведенного моделирования и имеют следующие значения:

- $w_1 = 0,35$ – структурированность патентных данных;
- $w_2 = 0,35$ – требуемая интерпретируемость;
- $w_3 = 0,20$ – ограничения по ресурсам;
- $w_4 = 0,10$ – размер задачи.

Осуществим формализацию критериев для расчета $\Phi_{\text{МГП}}$.

1. Уровень структурированности патентных данных рассчитывается в соответствии с выражением:

$$S_{\text{str}}(\kappa, \zeta) = 0,6 \cdot \min \left(1, \frac{\kappa}{0,25} \right) + 0,4 \cdot \zeta, \quad (20)$$

где $\zeta \in [0, 1]$ – степень структурированности данных на основании экспертных оценок;

κ – коэффициент связанности патентов, вычисляемый в соответствии с формулой:

$$\kappa = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\rho_{ij}|, \quad \rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (21)$$

где n – число патентов в рассматриваемом множестве;

$\rho_{ij} \in [0, 1]$ – коэффициент корреляции доходности i -го и j -го патентов;

$|\rho_{ij}|$ – абсолютное значение корреляции.

Значение k можно интерпретировать следующим образом: при $k \approx 1$ все патенты в рассматриваемом множестве сильно коррелированы (в одной или смежных технологических областях) и имеют высокий уровень системного риска; при $k \approx 0,5$ патенты имеют среднюю корреляцию (умеренная связанность); при $k \approx 0$ патенты относятся к разным технологическим областям (высокая диверсификация).

2. Требуемая интерпретируемость результатов $I \in [0,1]$ установлена на основе экспертных оценок: 0,0–0,3 – не требуется, 0,4–0,6 – желательна, 0,7–1,0 – критически важна. При этом диапазон значений может быть уточнен в соответствии с требованиями лица, принимающего решения, а также с учетом особенностей принимаемых решений [12].

3. Оценка ресурсов для решения задачи S_{res} определяется как нормированная оценка соответствия вычислительных возможностей системы возможностям МГП:

$$S_{\text{res}} = w_t \cdot \min \left(1, \frac{t_{\text{max}}}{t_{\text{МГП}}(n)} \right) + w_R \cdot \min \left(1, \frac{R_{\text{дост}}}{R_{\text{МГП}}(n)} \right), \quad (22)$$

где t_{max} – допустимое время выполнения задачи;

$R_{\text{дост}}$ – доступные вычислительные ресурсы (память, CPU);

$R_{\text{МГП}}$ – требуемые ресурсы для МГП;

w_t, w_R – веса временного и ресурсного факторов при $w_t + w_R = 1$;

$t_{\text{МГП}}(n)$ – оценка времени выполнения генетического программирования для n патентов, вычисляемая на основании:

$$t_{\text{ГП}} \approx k_{\text{ГП}} \cdot n^2 \cdot T_{\text{max}} \cdot N_{\text{pop}}, \quad (23)$$

где $k_{\text{МГП}}$ – константа системы;

n – число патентов в выборке;

T_{max} – число поколений в МГП (обычно 100–200);

N_{pop} – размер популяции деревьев (обычно 100–1000).

4. Для критерия «размер задачи» S_{size} на основе моделирования и анализа задач, решаемых на основе МГП [13], экспертным путем установлены следующие значения:

мных на основе МГП [13], экспертным путем установлены следующие значения:

$$S_{\text{size}}(n) = \begin{cases} 1,0 & n \leq 100 \\ 0,8 & 100 < n \leq 150 \\ 0,6 & 150 < n \leq 200 \\ 0,4 & 200 < n \leq 250 \\ 0,2 & 250 < n \leq 300 \\ 0 & n > 300 \end{cases}. \quad (24)$$

Таким образом, с учетом критериев структурированности, интерпретируемости, оценки ресурсов и размера задачи установлен порог выбора метода оптимизации из {МГП, МРЧ}: МГП – при $\Phi_{\text{МГП}} \geq 0,65$. В ином случае при $\Phi_{\text{МГП}} < 0,65$ в качестве метода оптимизации целесообразно использовать МРЧ. Правило выбора метода оптимизации имеет вид:

$$M = \begin{cases} \text{МГП}, & \Phi_{\text{МГП}} \geq 0,65 \\ \text{МРЧ}, & \Phi_{\text{МГП}} < 0,65 \end{cases}. \quad (25)$$

Такая ситуация типична для оперативных задач с большими портфелями, где важна высокая скорость решения, но интерпретируемость полученных результатов не требуется. Конкретно это случаи, когда оцениваемые критерии – такие, как низкая структурированность данных, нехватка времени или вычислительных ресурсов – приводят к падению общей оценки $\Phi_{\text{МГП}}$ ниже установленного порога.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3. Алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав

На основе заданной целевой функции $F(x)$, учитывающей доходность портфеля $V_D(x)$, уровень риска портфеля $V_R(x)$, диверсификацию портфеля $V_{\text{Div}}(x)$ и штрафные функции $P(x)$ за нарушение ограничений по каждому из элементов целевой функции, а также проведенного обоснования порядка выбора метода оптимизации рассмотрим алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав, включающий следующие этапы.

На первом этапе осуществляется подготовка данных, а именно:

1. Определяется множество РИД для обработки;

2. Для каждого РИД задаются атрибуты в соответствии с выражением (2);

3. Строится матрица ковариаций доходностей (формула (3)), рассчитываются коэффициенты корреляции ρ_{ij} и вычисляются коэффициенты связанности патентов к по формуле (21);

4. Определяются параметры, задаваемые на основе экспертных оценок: ξ – степень структурированности данных, I – требуемая интерпретируемость, t_{max} – допустимое время выполнения задачи, $R_{дост}$ – доступные вычислительные ресурсы.

На *втором этапе* производится выбор метода оптимизации. В рамках этого рассчитывается интегральная оценка применимости МГП:

$$\Phi_{МГП} = 0,35 \cdot S_{str} + 0,35 \cdot I + 0,20 \cdot S_{res} + 0,10 \cdot S_{size}(n). \quad (26)$$

При этом выбор метода осуществляется на основании правила (формула (25)).

На *третьем этапе* производится расчет целевой функции:

$$F(x) = V_D(x) - V_R(x) + V_{Div}(x) - \sum_{m=1}^4 P_m(x), \quad (27)$$

включающей следующие компоненты:

– доходность портфеля $V_D(x)$, вычисляемая по формуле (4);

– риск портфеля $V_R(x)$, вычисляемый по формуле (5);

– диверсификацию портфеля $V_{Div}(x)$, рассчитываемую в соответствии с формулой (6);

– штрафные функции: за превышение бюджета $P_1(x)$ (формула (7)), за превышение уровня риска $P_2(x)$ (формула (9)), за нарушение установленного размера портфеля $P_3(x)$ (формула (11)), за нарушение диверсификации $P_4(x)$ (формула (13)).

Для расчета компонентов целевой функции установлены следующие ограничения по бюджету (формула (8)), риску (формула (10)), размеру портфеля (формула (10)), уровню диверсификации (формула (12)).

На *четвертом этапе* производится оптимизация портфеля патентных прав на основе метода M , определяемого в соответствии с формулой (25).

При оптимизации на основе МГП осуществляется [14]:

1. Инициализация популяции, при которой создаются случайные синтаксические деревья (правила отбора РИД), где каждое дерево – это логическое выражение, по которому отбираются патенты (например, если $t_i > 10$ и $\sigma_i < 0,3$).

2. Оценка деревьев, при которой каждое из деревьев применяется к множеству РИД для получения бинарного вектора x , а также рассчитывается приспособленность дерева $F(x)$.

3. Селекция и генетические операторы:

– отбор лучших деревьев (турнирный, пропорциональный);

– кроссинговер (обмен поддеревьями);

– мутация (изменение узлов дерева).

4. Повторение, при котором шаги 2–3 выполняются T_{max} поколений (обычно 100–200). При этом сохраняются лучшее решение (дерево) и соответствующий вектор x^* .

5. Интерпретация результата, в рамках которой лучшее дерево преобразуется в правило, например «Выбирать патенты с $t_i > 8$ и $r_i > 100\,000$ ».

Таким образом при оптимизации на основе МГП сформированный портфель прав на РИД будет иметь вид:

$$S = \{p_i | x_i^* = 1\}. \quad (28)$$

При оптимизации на основе МРЧ осуществляется [15, 16]:

1. Инициализация роя, в ходе которой создаются M частиц, каждая из которых представляет случайный бинарный вектор $x \in \{0,1\}^n$ и задаются скорости частиц $v \in \mathbb{R}^n$.

2. Оценка частиц путем вычисления $F(x)$ для каждой из них. При этом производится сохранение (запоминание) лучшего положения частицы p_{best} и глобального лучшего положения g_{best} .

3. Обновление скоростей и позиций в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} = & wv_{id}^t + c_1r_1(p_{best,id} - x_{id}^t) + \\ & + c_2r_2(g_{best,id} - x_{id}^t), \end{aligned} \quad (29)$$

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{sigmoid}(v_{id}^{t+1}) > \text{rand}() \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (30)$$

где w , c_1 , c_2 – параметры;

$r_1, r_2 \sim U(0,1)$.

4. Выполнение шагов 2–3 для заданного числа итераций и сохранение g_{best} как итогового вектора x^* .

5. Формирование портфеля прав на РИД (формула (28)).

На пятом этапе осуществляется верификация и проводится постобработка данных. При этом проверяется выполнение ограничений по бюджету, риску, размеру портфеля и уровню диверсификации. При выявлении нарушений корректируются веса штрафов λ_m после чего повторяется четвертый этап (оптимизация).

Для пограничных значений функции оценки применимости МГП ($\Phi_{МГП} \approx 0,65$) оптимизация может производиться на основе двух методов (МГП и МРЧ) с выбором лучшего по $F(x)$ решения.

С учетом особенностей применяемых методов требуется проверка адекватности сгенерированного правила (для МГП) и ручной анализ состава сформированного портфеля (для МРЧ) [16].

На шестом этапе осуществляется формирование итогового отчета. Результирующий портфель прав на РИД может быть представлен выражением $S^* = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\}$, $m = |S^*|$. При этом доходность будет иметь вид $V_D(x^*)$, риск – $V_R(x^*)$, диверсификация – $V_{Div}(x^*)$, общая оценка – $F(x^*)$.

В рамках формирования рекомендаций для ЛПР при использовании МГП представляется правило отбора и его обоснование, а при МРЧ представляется список выбранных патентов и ключевые метрики.

При удовлетворении решений поставленным целям и задачам заданные весовые коэффициенты α , β , γ , ω_1 , ω_2 , λ_1 , ..., λ_4 сохраняются для использования в типовых задачах.

Блок-схема алгоритма формирования и оптимизации портфелей патентных прав представлена на рис. 1.

Представленный алгоритм практически реализован в специализированном программном обеспечении [17], разработанном на языке программирования python и позволяющем осуществлять поддержку принятия решений при управлении правами на РИД.

4. Примеры практического применения алгоритма формирования и оптимизации портфелей патентных прав

Пример 1. Формирование портфеля прав на РИД в области авиационной техники с помощью МГП.

Для первого примера отобраны 8 патентов на изобретения и полезные модели. На основе авторского программного обеспечения [17], позволяющего распознавать именованные сущности (NER) с применением модели машинного обучения, присвоены атрибуты для рассматриваемых объектов ИС, где ИЗО – изобретения, ПМ – полезные модели (табл. 1).

На основе результатов экспертного оценивания составлена матрица корреляций доходностей РИД (табл. 1).

Путем обработки исходных данных и результатов экспертного оценивания получены следующие параметры для решаемой задачи, требующиеся для расчета функции применимости $\Phi_{МГП}$:

$n = 8 (< 300)$;

$k = 0,52$ (средняя корреляция – высокая взаимосвязь авиационных технологий в выборке);

$\zeta = 0,7$ (данные структурированы по подотраслям);

$I = 0,9$ (требуется интерпретация для ЛПР);

$t_{max} = 3$ часа, $R_{дост} = 1,0$.

Таким образом:

$S_{str} = 0,6 \cdot \min(1, 0,52/0,25) + 0,4 \cdot 0,7 = 0,6 \cdot 1,0 + 0,28 = 0,88$;

$S_{res} = 1,0$ (ресурсов достаточно);

$S_{size} = 1,0$;

$\Phi_{МГП} = 0,35 \cdot 0,88 + 0,35 \cdot 0,9 + 0,20 \cdot 1,0 + 0,10 \cdot 1,0 = 0,308 + 0,315 + 0,20 + 0,10 = 0,923$.

Следовательно, с учетом базовых весовых коэффициентов: $\Phi_{МГП} = 0,923 > 0,65$, что предопределяет выбор МГП.

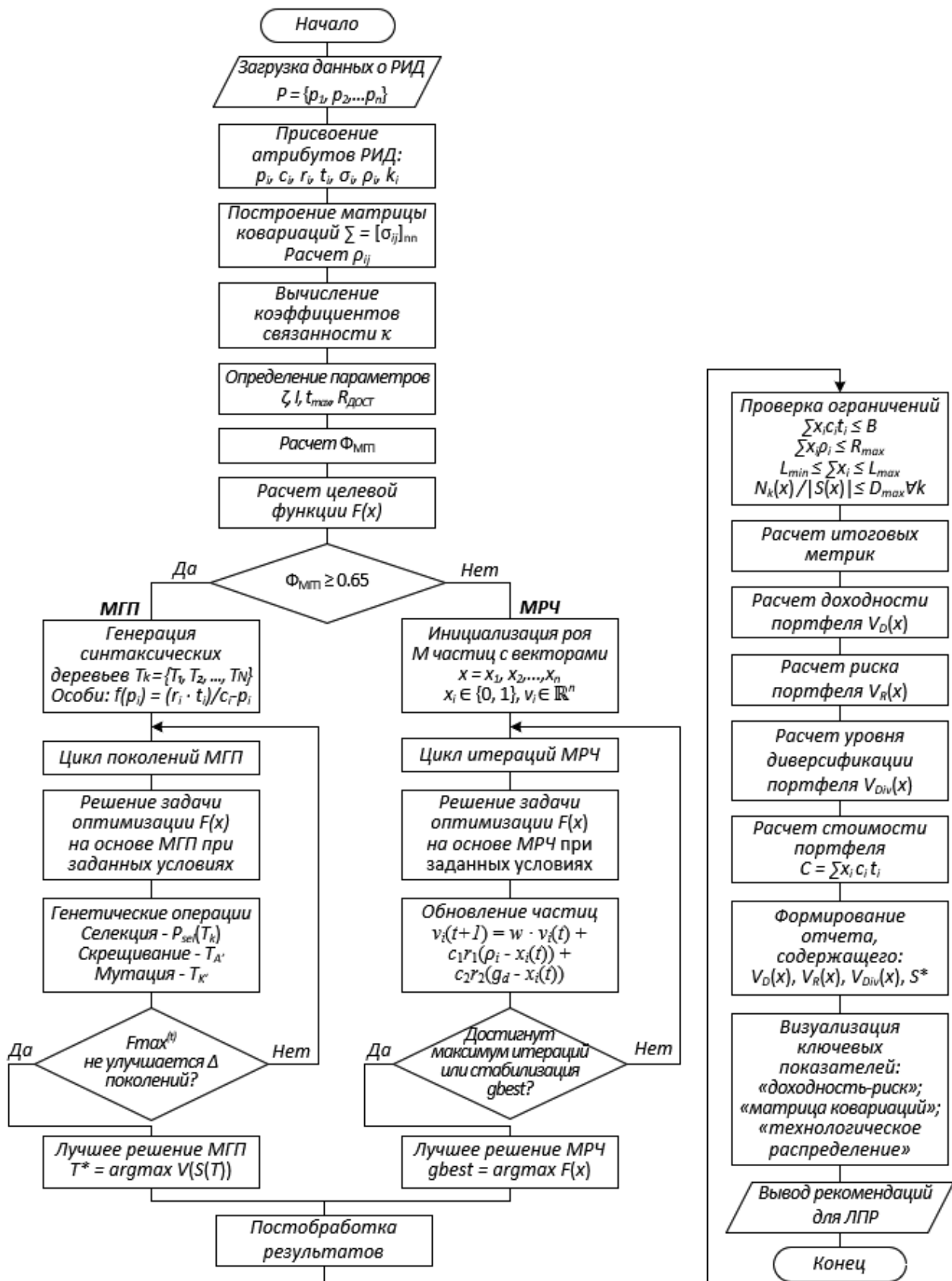


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования и оптимизации портфелей патентных прав

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 1

Атрибуты патентов

Название патента	Тип	Год действия	c_i (руб./год)	r_i (тыс. руб./год)	t_i (остаток лет)	σ_i (волатильность)	ρ_i (правовой риск)	k_i (подотрасль)
Композитные материалы для крыла	ИЗО	11	8 000	850	9	0,25	0,3	1 (Материалы)
Цифровой двойник силовой установки	ИЗО	9	3 000	1 200	11	0,30	0,2	2 (Цифровизация)
Система БПЛА для мониторинга ВПП	ПМ	7	4 000	400	3	0,35	0,4	3 (БПЛА)
Шумопоглощающие панели	ПМ	6	4 000	300	4	0,20	0,1	1 (Материалы)
Интеллектуальная система технического обслуживания	ИЗО	13	11 000	900	7	0,40	0,3	2 (Цифровизация)
Система противообледенения	ИЗО	9	3 000	500	11	0,28	0,2	4 (Системы безопасности)
Способ повышения топливной эффективности	ИЗО	11	8 000	–	9	0,32	0,3	5 (Двигатели)
Система навигации в сложных условиях	ИЗО	14	14 000	800	6	0,38	0,4	6 (Авионика)

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 2

Матрица корреляций доходностей

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,0	0,7	0,3	0,8	0,5	0,2	0,6	0,4
2	0,7	1,0	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,6
3	0,3	0,4	1,0	0,2	0,4	0,5	0,3	0,8
4	0,8	0,6	0,2	1,0	0,4	0,1	0,5	0,3
5	0,5	0,8	0,4	0,4	1,0	0,3	0,7	0,5
6	0,2	0,3	0,5	0,1	0,3	1,0	0,2	0,4
7	0,6	0,5	0,3	0,5	0,7	0,2	1,0	0,6
8	0,4	0,6	0,7	0,3	0,5	0,4	0,6	1,0

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

При заданных условиях параметрами целевой функции будут являться:

$$\alpha = 0,4, \beta = 0,3, \gamma = 0,3;$$

$\omega_1 = 0,3, \omega_2 = 0,7$ (акцент на системный риск, что связано с $\kappa = 0,52$);

$B = 80\,000$ руб. (выделенный бюджет на поддержание патентов в силе на ближайший год);

$$R_{max} = 2,0 \text{ (суммарный правовой риск } \leq 2,0);$$

$L_{min} = 3, L_{max} = 6$ (установленный размер портфеля 3 – 6 патентов);

$D_{max} = 0,5$ (не более 50 % патентов в одной подотрасли).

С применением МГП сгенерирована популяция деревьев, например:

1. IF (Тип = «Изобретение» AND $t_i \geq 8$) THEN «select»;

2. IF $((r_i - c_i) > 700\,000)$ THEN «select» (чистая годовая доходность > 700 тыс. руб.);

3. IF $(k_i \in \{1, 2, 5\} \text{ AND } \sigma_i < 0,35)$ THEN «select».

На основе эволюции (100 поколений) получены следующие результаты:

Поколение 1: Лучшее дерево – IF $(r_i > 700)$ THEN «select» при $F(x) = 3\,100\,000$;

Поколение 50: IF (Тип = «Изобретение» AND $(r_i - c_i) > 700\,000$ AND $\sigma_i < 0,35$) THEN «select»;

Поколение 100 (финальное): IF (Тип = «Изобретение» AND $(r_i - c_i) > 700\,000$ AND

$\sigma_i < 0,35$ AND $\rho_i < 0,35$) THEN «select» при $F(x) = 2\,850\,000$.

Применим полученные правила к РИД и проверим каждый патент (табл. 3).

Таблица 3

Результаты проверки в соответствии с правилами

№	Условия				Решение
	Тип = ИЗО	$r_i - c_i > 700\,000$	$\sigma_i < 0,35$	$\rho_i < 0,35$	
1	+	842 000	0,25	0,30	Отобразить
2	+	1 197 000	0,30	0,20	Отобразить
3	–	396 000	0,35	0,40	Отклонить
4	–	296 000	0,20	0,10	Отклонить
5	+	889 000	0,40	0,30	Отклонить
6	+	497 000	0,28	0,20	Отклонить
7	+	692 000	0,32	0,30	Отклонить
8	+	786 000	0,38	0,40	Отклонить

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таким образом, вектор решения будет иметь вид: $x = [1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$.

На основании этого можно резюмировать, что в соответствии с установленными исходными данными и заданными ограничениями в портфель прав отобраны 2 патента с показателями:

– общие затраты на поддержание в силе (на ближайший год) составят 11 000 руб. при установленном бюджете 80 000 руб.;

– годовая доходность от предоставления права использования составит 2 050 000 руб., при этом чистая годовая доходность равна 2 039 000 руб.;

– риск портфеля = 0,22 (низкий);

– технологическая диверсификация: 2 разные подотрасли (материалы, цифровизация);

– суммарный правовой риск равен 0,5, что в пределах установленного $R_{max} = 2,0$.

Интерпретируемое правило для ЛПР будет иметь вид: «Для формирования стратегического портфеля авиационных патентов отбирать только изобретения с чистой годовой доходностью > 700 тыс. руб., волатильностью доходности $< 35\%$ и правовым риском $< 35\%$ ».

Бюджетную эффективность можно представить в виде показателя ROI (отношение дохода к затратам): $2\,050\,000 / 11\,000 \approx 186:1$.

Вместе с тем итоговое решение не соответствует ограничению $L_{min} = 3$, $L_{max} = 6$. Для

устранения сложившейся ситуации требуется пересмотреть ограничения или добавить в портфель третий патент по дополнительному критерию (например, максимальный срок действия).

Пример 2. Оптимизация большого портфеля РИД в области авиационной техники с помощью МРЧ.

Пусть имеется множество РИД ($n = 300$), сгруппированных по 8 подотраслям авиационной техники на основании классификатора, сформированного экспертным путем, из них:

1. Силовые установки – 40 патентов.
2. Материалы – 35 патентов.
3. Авионика – 40 патентов.
4. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – 50 патентов.
5. Системы безопасности – 30 патентов.
6. Цифровизация – 60 патентов.
7. Инфраструктура – 20 патентов.
8. Сертификация – 20 патентов.

По типам патенты распределены следующим образом: изобретения (ИЗО) – 70 %, полезные модели (ПМ) – 30 %.

По аналогии с примером 1 путем обработки исходных данных и результатов экспертного оценивания получены следующие параметры для решаемой задачи, требующиеся для расчета функции применимости $\Phi_{МП}$:

- доходность $r_i = 50\text{--}2\,000$ тыс. руб./год (нормальное распределение);
- срок действия $t_i = 3\text{--}12$ лет (равномерное распределение);
- волатильность $\sigma_i = 0,15\text{--}0,45$;
- правовой риск $\rho_i = 0,1\text{--}0,5$;
- коэффициент связанности $k = 0,22$ свидетельствует о низкой корреляции и высокой диверсифицированности портфеля;
- структурированность данных $\xi = 0,4$ (средняя, данные структурированы по подотраслям);
- интерпретируемость $I = 0,2$ (интерпретация для ЛПР не требуется);
- время $t_{max} = 1$ час;
- вычислительные ресурсы $R_{дост} = 1,0$.

Для определения применимости МГП произведен расчет $\Phi_{МГП}$. В этих целях рассчитаем компоненты $\Phi_{МГП}$: S_{str} , S_{res} и S_{size} .

$$- S_{str} = 0,6 \cdot \min(1, 0,22 / 0,25) + 0,4 \cdot 0,4 = 0,6 \cdot 0,88 + 0,16 = 0,528 + 0,16 = 0,688;$$

$$- S_{res} = 0,9 \text{ (время ограничено, но ресурсов достаточно);}$$

$$- S_{size} = 0,2 \text{ при } n = 300 \in (200, 300];$$

$$- \Phi_{МГП} = 0,35 \cdot 0,688 + 0,35 \cdot 0,2 + 0,20 \cdot 0,9 + 0,10 \cdot 0,2 = 0,2408 + 0,07 + 0,18 + 0,02 = 0,5108.$$

Следовательно, с учетом базовых весовых коэффициентов: $\Phi_{МГП} = 0,5108 > 0,65$, что предопределяет выбор МРЧ.

Для применения МРЧ в целях оптимизации портфеля патентов зададим параметры:

- размер роя $M = 30$ частиц;
- цикл итераций = 80;
- параметры для обновления частиц: $w = 0,7$, $c_1 = 1,5$, $c_2 = 1,5$;
- $B = 2\,000\,000$ руб. (выделенный бюджет на поддержание патентов в силе на ближайший год);
- $R_{max} = 60,0$ (суммарный правовой риск);
- $L_{min} = 40$, $L_{max} = 80$ (установленный размер портфеля 40 – 80 патентов);
- $D_{max} = 0,3$ (не более 30 % патентов в одной подотрасли);
- веса компонентов целевой функции: $\alpha = 0,35$, $\beta = 0,35$, $\gamma = 0,3$; $\omega_1 = 0,4$, $\omega_2 = 0,6$.

При моделировании на основе МРЧ получены следующие результаты:

- после 1 итерации (случайная инициализация) получены 30 случайных бинарных векторов, при этом лучшая $F(x) = 1\,250\,000$;

- после 30 итерации обеспечена сходимость частиц к областям с высокой доходностью и низкой стоимостью при $F(x) = 3\,800\,000$. При этом выбраны 60 патентов;

- по итогам 80 итерации (финальной) сформирован глобальный лучший вектор x^* с $F(x) = 4\,850\,000$. Произведен отбор 62 патентов в соответствии с заданными условиями и ограничениями.

Статистика по отобранным для формирования портфеля патентам имеет вид:

- типа патентов: ИЗО – 45 (73 %), ПМ – 17 (27 %);

- размер портфеля: $62 \in [40, 80]$;

- затраты на поддержание: 1 850 000 руб. в год (в пределах ограничения B);

- годовая доходность: 42 500 000 руб. в год;

- чистая доходность: 40 650 000 руб. в год;

- риск портфеля: 0,28 (низкий);

- суммарный правовой риск: 18,6 (в пределах $R_{max} = 60$).

Бюджетную эффективность можно представить в виде показателя ROI (отношение дохода к затратам): $42\,500\,000 / 1\,850\,000 \approx 23:1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что МРЧ эффективен для средних портфелей (около 300 патентов). При этом оптимизация позволила сократить портфель на 30 патентов при росте доходности на 11,8%. Основной прирост доходности обеспечен за счет исключения низкорентабельных патентов, улучшения диверсификации и снижения совокупного риска. При этом время выполнения всех операций составила 25 минут при базовых вычислительных ресурсах.

Научная новизна разработанного алгоритма заключается в синтезе адаптивного механизма выбора между генетическим программированием (МГП) и методом роя частиц (МРЧ) для оптимизации портфелей патентных прав на основе формальных критериев структурированности данных (κ , ζ), требуемой интерпретируемости (I), ресурсных ограничений (S_{res}) и размера задачи (S_{size}). Впервые предложена интегральная оценка применимости метода ($\Phi_{МГП}$), которая позволяет автоматически и обоснованно переключаться между МГП, генерирующим интерпретируемые правила, и МРЧ, ориентированным на эффек-

тивный комбинаторный поиск. Это преодолевает ключевой недостаток существующих подходов, где выбор метода является эмпирическим, и позволяет адаптировать алгоритм к специфике задачи в области управления ИС, где сочетаются требования к объяснимости решений для стратегического планирования и к вычислительной эффективности для оперативного управления [18].

Практическая применимость алгоритма подтверждена моделированием на реальных данных. Алгоритм позволяет организациям и органам государственной власти автоматизировать процесс формирования портфелей прав на РИД для эффективных распоряжений ими [19]. Для решения задач, требующих предоставления ЛПР интерпретируемых правил отбора для повышения прозрачности и обоснованности решений, в алгоритме используется МГП. Для оперативных задач с большими объемами данных ($n > 300$, $I \leq 0,3$) алгоритм выбирает высокопроизводительный МРЧ, обеспечивая быструю оптимизацию в рамках ограничений по времени и ресурсам. Внедрение алгоритма в практику управления интеллектуальной собственностью способно позволить повысить доходность портфелей на 5–15% (по результатам моделирования) за счет адекватного выбора метода оптимизации, рационального использования бюджета на поддержание патентов в силе и снижения рисков за счет корректного учета требуемого уровня диверсификации через матрицу ковариаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм формирования и оптимизации портфелей патентных прав на основе методов генетического программирования и роя частиц, позволяющий формировать портфели прав на результаты интеллектуальной деятельности и проводить их оптимизацию с учетом заданных ограничений по доходности, риску, диверсификации и бюджету. Таким образом, цель исследования достигнута, поставленные задачи выполнены.

Проведенное исследование вносит вклад в совершенствование порядка управления правами на РИД в аспекте интеллектуального анализа данных и финансовой оптимизации.

В разработанном алгоритме предложен подход к ситуативному выбору наиболее адекватного метода до начала оптимизации, что снижает вычислительные затраты и повышает целевую эффективность. Также алгоритм адаптирует классическую финансовую модель Марковица к специфике нематериальных активов. Таким образом, работа восполняет пробел в методологии оптимизации портфелей патентных прав, предлагая систематизированный, автоматизированный и эмпирически обоснованный инструмент принятия решений в органах государственной власти и организациях авиационной промышленности.

Проведенный анализ предметной области в ходе исследования позволил выделить перспективные направления дальнейших исследований. К ним можно отнести:

1. Расширение набора критериев для выбора метода оптимизации: включение динамических факторов, таких как изменчивость технологических трендов или геополитические риски, которые особенно актуальны для РИД двойного назначения.

2. Разработку итеративных и гибридных алгоритмов двухэтапной оптимизации, когда после быстрого поиска с помощью МРЧ в суженном пространстве решений применяется МГП для генерации локальных интерпретируемых правил.

3. Интеграцию с методами машинного обучения для использования исторических данных о результатах оптимизации в целях обучения классификатора, предсказывающего оптимальный метод или непосредственно параметры метода, такие как глубину деревьев в МГП или размер роя в МРЧ.

4. Валидацию на разнородных данных, а именно – тестирование алгоритма на портфелях из других высокотехнологичных отраслей (информационные технологии, фармацевтика, энергетика) для проверки его обобщающей способности и калибровки пороговых значений.

Предложенный алгоритм направлен на развитие систем информационной поддержки принятия решений для стратегического планирования в государственных и корпоративных структурах.

Список источников

1. Якунин А. В. К исследованию базовых показателей развития инновационной активности предприятий авиационной промышленности РФ // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2020. Т. 11, № 4. С. 76–82. <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-4-76-82>.
2. Краев В. М., Силуянова М. В., Тихонов А. И. Подходы к разработке моделей жизненного цикла отечественной авиационной техники // Московский экономический журнал. 2019. № 1. С. 536–546. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11052>.
3. Виноградов А. М., Бочкова Е. А. Кредит под залог интеллектуальной собственности как фактор развития бизнеса // Финансовые рынки и банки. 2022. № 1. С. 55–60.
4. Аношин М. И., Самсонова А. И. Модели коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности, созданных ОПК // Экономика космоса. 2023. Т. 2, № 1 (3). С. 38–49. https://doi.org/10.48612/agat/space_economics/2023.02.03.05.
5. Титов А. К. Стратегическое планирование коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности в сфере исследований и разработок // Стратегии бизнеса. 2022. Т. 10, № 1. С. 4–7. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2022-1-4-7>.
6. Сальникова К. В. Исследование особенностей коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности // Социальные и экономические системы. 2022. № 6. С. 268–287.
7. Прудников С. И. Обработка больших данных в системах поддержки принятия решений специального назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 48–52.
8. Федоров Г. В. Применение теории Марковица к криптовалютному портфелю // Белгородский экономический вестник. 2023. № 2 (110). С. 91–94.
9. Прудников С. И. Оценивание качества автоматизированного обнаружения вредоносной информации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 60–65.
10. Богомолов А. В., Климов Р. С. Автоматизация обработки информации при проведении коллективных сетевых экспертиз // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71, № 11. С. 509–512.
11. Тобин Д. С., Богомолов А. В., Голосовский М. С. Организация испытаний программного обеспечения для различных моделей его жизненного цикла // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 7, С. 132–135.
12. Прудников С. И., Богомолов А. В., Теребов Д. С. Направления совершенствования поддержки принятия решений в органах военного управления // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 6. С. 16–19.
13. Чесноков С. Е. Эволюционные стратегии в машинном обучении // Труды Поволжского государственного

References

1. Yakunin A. V. To the study of basic indicators of the development of innovative activity of enterprises of the aviation industry of the Russian Federation. *Vestnik of Samara University. Economics and Management*. 2020;11(4):76–82. <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-4-76-82>. (In Russ.).
2. Krayev V. M., Siluyanov M. V., Tikhonov A. I. Approaches to development of models of life cycle of domestic aircraft equipment. *Moscow economic journal*. 2019;(1):536–546. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11052>. (In Russ.).
3. Vinogradov A. M., Bochkova E. A. Loan secured by intellectual property as business development factor. *Finansovye rynki i banki*. 2022;(1):55–60. (In Russ.).
4. Anoshin M. I., Samsonova A. I. Commercialization models of intellectual property, generated by military-industrial complex. *Space Economics*. 2023;2(1):38–49. https://doi.org/10.48612/agat/space_economics/2023.02.03.05. (In Russ.).
5. Titov A. K. Strategic planning of commercialization of the results of intellectual activity in the field of research and development. *Business Strategies*. 2022;10(1):4–7. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2022-1-4-7>. (In Russ.).
6. Salnikova K. V. Examining the specifics of the commercialization of intellectual property assets. *Sotsialnye i ekonomicheskie sistemy*. 2022;(6):268–287. (In Russ.).
7. Prudnikov S. I. Big data processing in systems decision support special appointments. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2023;(5):48–52. (In Russ.).
8. Fedorov G. V. Primenenie teorii Markovitsa k kriptovalyutnomu portfelyu. *Belgorodskiy ekonomicheskiy vestnik*. 2023;(2):91–94. (In Russ.).
9. Prudnikov S. I. Assessing the quality of automated malicious information detection. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):60–65. (In Russ.).
10. Bogomolov A. V., Klimov R. S. Automation of information processing during collective network expert examinations. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2017;71(11):509–512. (In Russ.).
11. Tobin D. S., Bogomolov A. V., Golosovskiy M. S. Organization of testing the software for different models of its life cycle. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*. 2021;(7):132–135. (In Russ.).
12. Prudnikov S. I., Bogomolov A. V., Terebov D. S. Directions for improving decision support in military administration bodies. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*. 2022;(6):16–19. (In Russ.).
13. Chesnokov S. E. Evolutionary strategies in machine learning. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnologicheskaya*. 2024;(12):42–51. (In Russ.).
14. Zhang L., Filimonov N. B. Identification of dynamic systems based on a combination of methods genetic programming and sparse regression. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024;(44):37–

- ного технологического университета. Серия: Технологическая. 2024. № 12. С. 42–51.
14. Чжан Л., Филимонов Н. Б. Идентификация динамических систем на основе комбинации методов генетического программирования и разреженной регрессии // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. № 44. С. 37–45. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-44-37-45>.
15. Бушуев А. Ю., Маремшаова А. А. Сравнение модифицированного метода Ψ-преобразования и канонического метода роя частиц // *Математическое моделирование и численные методы*. 2018. № 3. С. 22–37. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2018-3-2135>.
16. Alekseytsev A. V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7. P. 175–185. <https://doi.org/10.18720/MCE.83.16>.
17. Прудников С. И. Программа управления интеллектуальной собственностью : свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2025663948 Рос. Федерация ; заявл. 19.05.2025; опубл. 02.06.2025.
18. Прохоров М. А., Прудников С. И., Асеев А. О. и др. Методология оценивания качества функционирования специализированных систем информационного обеспечения научных исследований // *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. Т. 78, № 7. С. 332–336.
19. Прудников С. И., Котляр А. В. Метод формирования ведомственных сетевых экспертных сообществ // *Математические методы в технологиях и технике*. 2023. № 3. С. 104–107. https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_104.
45. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-44-37-45>. (In Russ.).
15. Bushuev A. Yu., Maremsaova A. A. Ψ-transformation optimization method in comparison with canonical particle swarm optimization method. *Mathematical Modeling and Computational Methods*. 2018;(3):22–37. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2018-3-2135>. (In Russ.).
16. Alekseytsev A. V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(7):175–185. <https://doi.org/10.18720/MCE.83.16>.
17. Prudnikov S. I. Intellectual property management program. RU State registration certificate of computer program No. 2025663948, filed May 19, 2025, issued June 2, 2025. (In Russ.).
18. Prokhorov M. A., Prudnikov S. I., Aseev A. O. et al. Metodologiya otsenivaniya kachestva funktsionirovaniya spetsializirovannykh sistem informatsionnogo obespecheniya nauchnykh issledovaniy. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2024;78(7):332–336. (In Russ.).
19. Prudnikov S. I., Kotlyar A. V. Method of forming departmental network expert communities. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*. 2023;(3):104–107. https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_104. (In Russ.).

Информация об авторе

С. И. Прудников – кандидат технических наук;
<https://orcid.org/0000-0002-5136-8521>,
prudnikovscience@gmail.com

About the author

S. I. Prudnikov – Candidate of Sciences (Engineering);
<https://orcid.org/0000-0002-5136-8521>,
prudnikovscience@gmail.com

Научная статья

УДК 004.438Python+004.92

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-6>



Визуализация онтологического графа с использованием библиотеки pydot Python

Кирилл Валерьевич Святлов, Игорь Александрович Щукарев✉

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Аннотация. При попытке визуализации русскоязычной онтологии с помощью библиотеки pydot в Python получается граф знаний, который содержит неправильно отображающиеся кириллические символы. Задание шрифта с поддержкой русского языка в процессе описания графа никак не влияет на итоговое изображение. Решить данную проблему предлагается путем явного задания кодировки в момент экспорта изображения в файл командой `.write_png('output.png', encoding='utf8')`. Вследствие этого появляется возможность построения графа знаний с поддержкой кириллических символов средствами языка программирования Python. Предложенный в статье способ визуализации русскоязычных онтологий средствами Python может быть полезен ИТ-специалистам, которые принимают участие в разработке информационных систем на основе таких онтологий, либо преподавателям, работающим с онтологиями в рамках образовательного процесса.

Ключевые слова: библиотека pydot, язык python, информационная система, граф знаний, русскоязычная онтология, кириллические символы, кодировка utf8

Для цитирования: Святлов К. В., Щукарев И. А. Визуализация онтологического графа с использованием библиотеки pydot Python // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 64–69. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-6>.

Original article

Ontology graph visualization using pydot library in Python

Kirill V. Svyatov, Igor A. Shchukarev✉

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Abstract. Visualization of a Russian-language ontology using the pydot library in Python leads to the creation of a knowledge graph with incorrectly displayed Cyrillic characters. Assignment of a Russian-language supporting font while defining the graph has no influence on the final image. The study proposes a solution to this problem which lies in setting an explicit encoding when exporting the image as a file via the `.write_png('output.png', encoding='utf8')` command. This procedure enables the creation of a knowledge graph with Cyrillic script support. The introduced method of Russian-language ontologies visualization in Python can be applied by IT specialists in developing information systems based on ontologies under consideration or by educators using the ontologies in the teaching process.

Keywords: pydot library, Python, information system, knowledge graph, Russian-language ontology, Cyrillic characters, utf8 encoding

For citation: Svyatov K. V., Shchukarev I. A. Ontology graph visualization using pydot library in Python. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):64–69. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-6>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время графическая визуализация используется для представления различной структурированной информации. Выбор

конкретного инструмента для разного рода диаграмм, абстрактных графиков или сетей зависит от цели. Например, для документов отлично подойдет статичное изображение,

для мониторинга можно использовать интерактивную схему, а для детального анализа – топологию. Визуализировать информацию, которая представима в виде объектов и связей между ними, можно также и с помощью графов. Графовые модели представляют собой наглядную схему данных, связанных друг с другом. Такое графическое представление можно встретить, например, в разработке баз данных и программного обеспечения, в сетевых технологиях, веб-дизайне машинном обучении и во многих других областях [1].

На сегодняшний день существует несколько программ для работы с базами знаний. Среди них можно выделить Protégé и Fluent Editor. Инструмент Protege, который является Java-программой, содержит редактор онтологий и предполагает использование языка OWL, а также Manchester Syntax. Фреймворк Protege поддерживает визуализацию онтологий, работу с машиной логического вывода, создание иерархической структуры классов, работу с различными типами свойств и т.д. [2, 3]. Программа Fluent Editor от компании Cognitum представляет собой приложение, которое дает возможность редактировать базы знаний, поддерживает логический вывод и создание графического представления связей между понятиями и их экземплярами. Его отличительной особенностью является то, что он позволяет разрабатывать базы знаний без глубокого понимания синтаксиса языка OWL, так как для создания онтологий используется естественный язык, а именно английский, к которому применены определенные правила и ограничения [4]. Python является высокоуровневым языком программирования с открытым исходным кодом, который поддерживает подходы объектно-ориентированного и структурного программирования. Python можно использовать для решения разнообразных задач в различных сферах деятельности [5]. В Python для работы с онтологиями используется библиотека *owlready2*. Данный модуль поддерживает создание и редактирование онтологий, импорт и экспорт в формате OWL, управление клас-

сами, экземплярами и свойствами онтологии как объектами языка Python, использование машины логического вывода (*reasoner HemiT* или *Pellet*) и многое другое [6].

Так, авторами работы [7] был построен граф онтологии для наглядной демонстрации онтологического представления основной образовательной программы в редакторе Protégé. В статье [8] рассматривается подход с использованием инструмента *Ontodia* для визуализации онтологических графов, содержащих пустые узлы (*Blank nodes*) и используемых для представления объектов, не имеющих постоянных идентификаторов, то есть IRI. В работе [9] авторами разработан прототип программного обеспечения, позволяющий визуализировать графовую модель на основе имеющихся данных. Интерактивный граф, построенный на основе данных, полученных из базы данных, выводится в формате *html*. В статье [10] для визуализации онтологии был выбран алгоритм послойной отрисовки графа, а сама реализация выполнена средствами библиотеки *Javascript Dagre*. Для рендера графа, то есть получения изображения по модели, был использован *React-Flow*, который является инструментом на основе языка *Javascript* и фреймворка *React*.

При разработке ИС, в основе которых лежат онтологии, желательно использовать один инструмент, позволяющий работать как с кодом, так и с онтологиями без потери функциональности. Использование языка Python при разработке простейших ИС с онтологиями более чем оправдано из-за наличия модуля для работы с базами знаний – *owlready2*, и библиотеки для разработки графического интерфейса пользователя – *tkinter* [11]. Библиотека *Pydot* является интерфейсом Python к языку программирования DOT, который представляет собой текстовое описание структуры графа, а именно вершин, связей между ними, а также атрибутов для их визуального оформления. Он позволяет разработчикам программно генерировать, обрабатывать и отображать описания графов. Таким образом, исследование способа визуализации русско-

язычного графа средствами библиотеки pydot языка Python является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Зачастую в процессе разработки может потребоваться визуально просмотреть изменения, внесенные в онтологию. Для этого необходимо экспортировать онтологию и с помощью Protégé или Fluent Editor получить граф знаний. Однако выполнить такую цепочку действий при каждом изменении или при тестировании не очень удобно, а возмож-

ность визуализации онтологии в библиотеке owlready2 отсутствует. С другой стороны, для визуализации графов можно использовать другую библиотеку Python, а именно pydot. Этот инструмент позволяет визуализировать графы и создавать различные диаграммы. При создании графов пакет ищет шрифты в различных каталогах по умолчанию, а также в известных системных каталогах шрифтов. Тем не менее модуль корректно визуализирует только графы с англоязычными символами (рис. 1, 2).

```
1 import pydot
2 graph = pydot.Dot(graph_type='digraph', rankdir='TB', fontname='Arial')
3 graph.set_size('50,50!')
4 node1 = pydot.Node(name="Node 1", shape="circle", color="blue", fontname='Arial')
5 node2 = pydot.Node(name="Node 2", shape="box", color="red", fontname='Arial')
6 graph.add_node(node1)
7 graph.add_node(node2)
8 edge = pydot.Edge(node1, node2, label='distance between 1 and 2', fontname='Arial')
9 graph.add_edge(edge)
10 graph.write_png('output.png')
```

Рис. 1. Фрагмент кода для построения англоязычного графа

Примечание: составлено авторами.

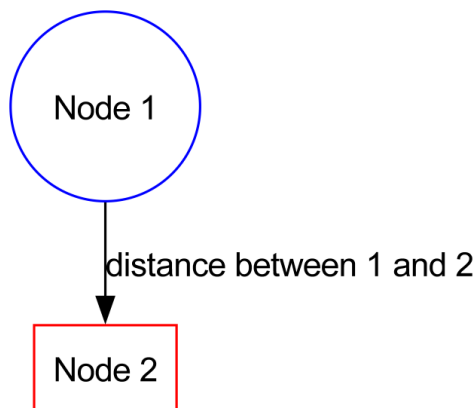


Рис. 2. Внешний вид англоязычного графа

Примечание: составлено авторами.

Если же использовать русский текст при описании графа, то на выходе получаются нечитаемые данные. Задание в явном виде шрифтов, которые поддерживают кириллические символы, также не дает никакого результата (рис. 3, 4).

Для решения поставленной задачи были проанализированы различные способы задания кодировки и этапы, на которых ее мож-

но указывать, для визуализации графа знаний, благодаря чему и было найдено предлагаемое в статье решение. Для корректного отображения русского языка на итоговой картинке необходимо в явном виде указать кодировку UTF-8 в момент экспорта в файл png следующим образом:

```
graph.write_png('output.png',
encoding='utf8')
```

```
1 import pydot
2 graph = pydot.Dot(graph_type='digraph', rankdir='TB', fontname='Arial')
3 graph.set_size('50,50!')
4 node1 = pydot.Node(name="Узел 1", shape="circle", color="blue", fontname='Arial')
5 node2 = pydot.Node(name="Узел 2", shape="box", color="red", fontname='Arial')
6 graph.add_node(node1)
7 graph.add_node(node2)
8 edge = pydot.Edge(node1, node2, label='расстояние между 1 и 2', fontname='Arial')
9 graph.add_edge(edge)
10 graph.write_png('output.png')
```

Рис. 3. Фрагмент кода для построения русскоязычного графа

Примечание: составлено авторами.

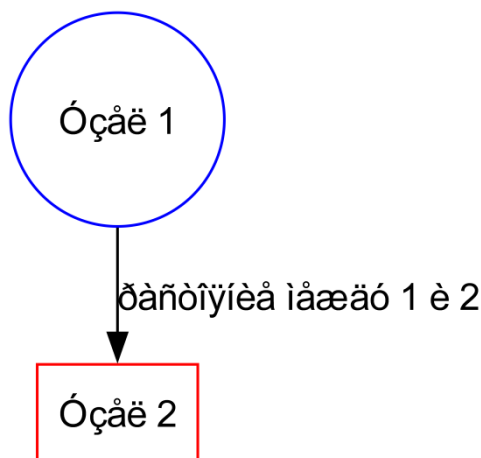


Рис. 4. Внешний вид русскоязычного графа

Примечание: составлено авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки работы предложенного метода средствами библиотеки owlready2 Python была разработана русскоязычная фармацев-

тическая онтология (рис. 5) и с помощью библиотеки pydot написан код для получения графа знаний (рис. 6, 7).

```
onto = get_ontology("http://test.org/onto.owl")

with onto:
    # class()
    class Аптека(Thing): pass 1 usage
    class Привет(Thing): pass
    class Лекарственные_средства(Аптека): pass 23 usages
    class Условия_отпуска_из_аптек(Лекарственные_средства): pass 2 usages
    class По_рецепту(Условия_отпуска_из_аптек): pass 1 usage
    class Без_рецепта(Условия_отпуска_из_аптек): pass 1 usage
    class Показания_к_применению(Лекарственные_средства): pass 1 usage
    class лечится(ObjectProperty):
        domain = [Показания_к_применению]
        range = [Лекарственные_средства]
```

Рис. 5. Фрагмент кода фармацевтической онтологии с помощью модуля Owlready2

Примечание: составлено авторами.

```
265 for ind in onto.individuals():
266     graph.add_node(pydot.Node(str(ind.name), shape="ellipse", style="filled", fillcolor="lightgreen"))
267     for cls in ind.is_a:
268         if isinstance(cls, ThingClass):
269             graph.add_edge(pydot.Edge(str(ind.name), str(cls.name), label="instance_of", style="dotted"))
270
271 for ind in onto.individuals():
272     for prop in onto.data_properties():
273         values = prop[ind]
274         for val in values:
275             literal_node_name = f"{ind.name}_{prop.name}_{val}"
276             graph.add_node(pydot.Node(literal_node_name, shape="note", style="filled", fillcolor="lightyellow"))
277             graph.add_edge(pydot.Edge(str(ind.name), literal_node_name, style="dashed"))
278
279 graph.write_png('output.png', encoding='utf8')
```

Рис. 6. Фрагмент кода для построения русскоязычного графа на основе русскоязычной онтологии с использованием предложенного способа

Примечание: составлено авторами.

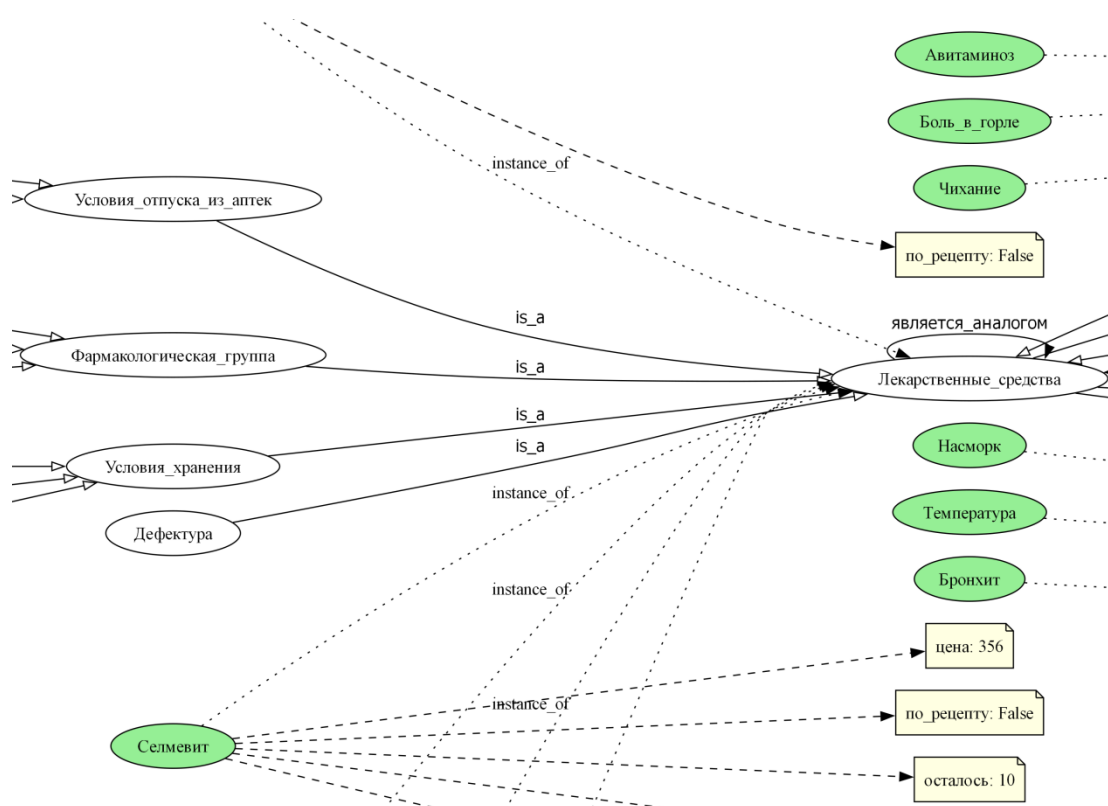


Рис. 7. Корректное отображение кириллических символов на фрагменте графа на основе русскоязычной онтологии в pydot

Примечание: составлено авторами.

Как видно из рис. 7, после выполнения данной команды на итоговом изображении русский язык отображается корректно и появляется возможность получать графы знаний русскоязычных онтологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в статье решена проблема корректного отображения кириллических символов на графе знаний русскоязычной онтологии. Пу-

тем указания кодировки UTF-8 в момент экспорта в файл в Python появляется возможность визуализации русскоязычных онтологий с помощью библиотеки pydot. Предложенный в статье способ может быть полезен ИТ-специалистам, которые участвуют в разработке информационных систем на основе таких онтологий, либо преподавателям, работающим с онтологиями в рамках образовательного процесса.

Список источников

1. Русаков А. М., Юшкова Н. А., Селиванова Е. А. Современные средства визуализации графов и графовых моделей для Python // Наукосфера. 2022. № 11 (2). С. 258–267.
2. Напольских Д. Л. Представление экономической концепции кластера с помощью специализированной онтологии // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37, № 2. С. 155–163.
3. Ovcinnikova J. Ontology export patterns in OWL-GrEd editor // Baltic Journal of Modern Computing. 2020. Vol. 8, no. 3. P. 444–460.
4. Сосинская С. С., Сивушков И. Д., Дубинин Д. А. и др. База знаний о состоянии здоровья обучающихся и клиентское приложение для взаимодействия с пользователем // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 3 (45). С. 325–335.
5. Дучаев М. М., Гордеев-Бургвиц Д. М., Гордеев-Бургвиц М. А. Python: преимущества и роль в наше время // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 4. С. 51–54.
6. Jean-Baptiste L. Ontologies with Python: Programming OWL 2.0 ontologies with Python and Owlready2. New York : Apress, 2020. 344 p.
7. Назаров Е. В. Онтологическое представление основной образовательной программы // Вестник кибернетики. 2021. № 3 (43). С. 51–59.
8. Раздьяконов Д. С., Морозов А. В., Павлов Д. С. и др. Подход к обработке пустых узлов при порционной визуализации данных на примере инструмента Ontodia // Программирование. 2020. № 6. С. 16–29.
9. Карандеев А. А., Яшин Н. А., Кудряшев Р. А. Визуализация графовой модели медицинских препаратов и их классов с учетом несовместимости // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 5. С. 64–72.
10. Лисин В. А., Серый А. С., Сидорова Е. А. Модель представления онтологии предметных областей на основе графовых баз данных // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 4. С. 24–38.
11. Крамаренко Т. А., Безрук И. С. Сравнительный анализ GUI библиотек популярных языков программирования для разработки бизнес-приложений // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2025. № 2 (361). С. 57–63.

Информация об авторах

К. В. Святов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-8978-8567>,
k.svyatov@gmail.com

И. А. Щукарев – кандидат физико-математических наук;
<https://orcid.org/0000-0002-8860-8103>,
blacxpress@gmail.com✉

References

1. Rusakov A. M., Yushkova N. A., Selivanova E. A. Modern graph visualization tools and graph models for Python. *Naukosfera*. 2022;(11):258–267. (In Russ.).
2. Napolskikh D. L. Developing a specialized ontology to represent the economic concept of a cluster. *Software & Systems*. 2024;37(2):155–163. (In Russ.).
3. Ovcinnikova J. Ontology export patterns in OWL-GrEd editor. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2020;8(3):444–460.
4. Sosinskaya S. S., Sivushkov I. D., Dubinin D. A. et al. Knowledge base on the health status of students and a client application for user interaction. *Ontology of designing*. 2022;12(3):325–335. (In Russ.).
5. Duchaev M. M., Gordeev-Burgwitz D. M., Gordeev-Burgwitz M. A. Python: Advantages and role in our time. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya*. 2025;(4):51–54. (In Russ.).
6. Jean-Baptiste L. Ontologies with Python: Programming OWL 2.0 ontologies with Python and Owlready2. New York: Apress; 2020. 344 p.
7. Nazarov E. V. Ontological representation of basic educational program. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(3):51–59. (In Russ.).
8. Razd'yakonov D. S., Morozov A. V., Pavlov D. S. et al. Approach to blank node processing in incremental data visualization by the example of ontodia. *Programming and Computer Software*. 2020;(6):16–29. (In Russ.).
9. Karandeev A. A., Iashin N. A., Kudryashev R. A. Visualization of a graph model of medical drugs and their classes with subject to incompatibility. *Scientific Visualization*. 2023;15(5):64–72. (In Russ.).
10. Lisin V. A., Sery A. S., Sidorova E. A. Domain ontology representation model based on graph databases. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2022;20(4):24–38. (In Russ.).
11. Kramarenko T. A., Bezruk I. S. Comparative analysis of GUI libraries for popular programming languages in business application development. *Bulletin of Adyge State University. Series: Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2025;(2):57–63. (In Russ.).

About the authors

K. V. Svyatov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0001-8978-8567>,
k.svyatov@gmail.com

I. A. Shchukarev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics);
<https://orcid.org/0000-0002-8860-8103>,
blacxpress@gmail.com✉

Научная статья

УДК 519.87

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-7>



Модификация метода TOPSIS

Павел Константинович Симаков

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема многокритериального выбора в условиях неопределенности, вызванной субъективным назначением весовых коэффициентов для критериев. Для решения этой проблемы предлагается подход, основанный на использовании интервальных оценок важности критериев вместо точечных значений. Этот подход повышает адекватность модели и устойчивость получаемых решений. Также предложена модификация метода TOPSIS, адаптированная для работы с интервально заданными весами на бесконечном множестве альтернатив. В рамках этого подхода вводится концепция мягкого TOPSIS-решения, устойчивого к вариациям весовых коэффициентов в заданных пределах. Практическая значимость и работоспособность методики проверена на примере оптимизации состава многокомпонентной смеси.

Ключевые слова: многокритериальная задача, принятие решений, неопределенность, интервальные веса, TOPSIS, мягкое решение

Для цитирования: Симаков П. К. Модификация метода TOPSIS // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 70–83. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-7>.

Original article

TOPSIS method modification

Pavel K. Simakov

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article considers the problem of multi-criteria decision analysis under uncertainty conditions caused by subjective weights of the criteria. The paper addresses the specified issue as well as proposes an approach of interval criteria estimation instead of point assessment. This technique improves the model's sufficiency and solutions stability. The study presents a modification of the TOPSIS method, which lies in its adaptation for interval-defined weights on an infinite set of alternatives. Moreover, the approach introduces a soft TOPSIS concept that is resistant to changes in criteria weights within set limits. The author tests the method's practical significance and efficiency by optimizing a multicomponent mixture formula.

Keywords: multi-criteria decision analysis, decision-making, uncertainty, interval weights, TOPSIS, soft decision

For citation: Simakov P. K. TOPSIS method modification. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):70–83. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-7>.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование поведения сложных управляемых систем неразрывно связано с решением многокритериальных задач. Ключевой проблемой при этом является субъективный характер оценки относительной важности оп-

тимизируемых критериев со стороны лица, принимающего решение (ЛПР). Зачастую даже незначительные вариации в определении весовых коэффициентов могут приводить к существенно различным оптимальным решениям. Несмотря на наличие широкого

спектра методов решения многокритериальных задач, их практическое применение часто ограничено трудностью априорного точного задания весов критериев.

Указанную проблему можно смягчить, перейдя от точечных оценок весов к интервальным, что позволяет ЛПР выражать свои предпочтения в форме, требующей менее точной количественной информации. В настоящей работе предлагается подход, в котором ЛПР задает значимость критериев на основе неполной информации, формализуемой в виде интервальной неопределенности. В рамках данного подхода представлена модификация метода TOPSIS для работы с интервальными весами и непрерывным множеством альтернатив. Формализовано новое понятие решения многокритериальной задачи: мягкое TOPSIS-решение, сохраняющее устойчивость при незначительных изменениях весов. Практическая применимость предложенных концепций демонстрируется на примере задачи определения оптимальной рецептуры многокомпонентной смеси в условиях неполной информации о предпочтениях ЛПР.

Моделирование и анализ сложных управляемых систем неизбежно связаны с необходимостью выбора решений, оптимальных одновременно по нескольким критериям. Многокритериальные задачи принятия решений (MCDA) находят широкое применение в различных областях, включая исследование внедрения электромобилей [1], повышение надежности программного обеспечения [2], выбор терапии при сахарном диабете [3], формирование автопарка для междугородных перевозок [4] и анализ проблем, возникающих при внедрении Индустрии 4.0 [5].

Особую актуальность MCDA приобретают в сфере разработки и оптимизации рецептур в пищевой и химической промышленности, где необходимо одновременно учитывать множество зачастую конфликтующих требований: стоимость сырья, питательную ценность, органолептические свойства, технологические параметры и экологические аспекты. В исследовании по разработке рецептуры хле-

ба с цельнозерновой мукой [6] применялись методы анкетирования потребителей и регрессионного анализа для оптимизации соотношения компонентов по органолептическим и физико-химическим критериям. При оптимизации творожной массы для детского питания [7] использовалась комбинация линейного программирования и матричного метода проектирования для максимизации содержания витамина С при минимизации себестоимости.

Теоретической основой многокритериальной оптимизации служат концепции векторных оптимумов, среди которых оптимальность по Парето [8] нашла наиболее широкое применение в прикладных исследованиях. Однако ключевая практическая проблема использования Парето-оптимальности заключается в том, что полученное множество решений часто оказывается чрезмерно большим для практического выбора.

Для решения этой задачи разработан ряд конструктивных методов, включая метод взвешенной суммы, TOPSIS [9], COPRAS [10] и EDAS [11]. В частности, метод TOPSIS демонстрирует высокую эффективность при работе с конфликтующими критериями. Однако корректное применение этих методов требует от ЛПР точного априорного задания весов критериев, что сопряжено со значительными трудностями из-за субъективной природы понятия «важность критерия».

Использование интервальных весов предлагается в качестве перспективного подхода, упрощающего процесс оценки важности критериев для ЛПР. Данный подход позволяет формализовать неполную информацию о предпочтениях и снижает влияние погрешностей при назначении весов. Важно отметить, что даже незначительные вариации в определении весовых коэффициентов могут привести к существенному изменению итогового выбора альтернативы.

В контексте метода TOPSIS концепция интервальных весов исследовалась ранее, однако существующие подходы имеют ограничения. В работе [12] учитывались только

экстремальные значения интервалов, что потенциально ведет к потере информации. В [13] предложена модель, где оценка альтернативы определяется как максимально достижимое значение средневзвешенного показателя. Предлагаемое в настоящем исследовании развитие метода TOPSIS для работы с интервальными весами направлено на преодоление указанных ограничений и повышение устойчивости решений к вариациям в оценках важности критериев.

В теории принятия решений традиционно рассматриваются два типа множеств альтернатив – дискретные и непрерывные. Если в первом случае альтернативы представляют собой конечное число четко определенных вариантов, то во втором мы имеем дело с бесконечным (континуальным) множеством альтернатив, описываемых непрерывными параметрами. Для бесконечных альтернатив множество Парето часто представляет собой непрерывную поверхность или гиперповерхность в пространстве критериев. Проблема выбора наилучшего решения в условиях противоречивых критериев является центральной, а для задач с бесконечным множеством альтернатив, где пространство возможных решений является непрерывным, прямое перечисление и сравнение всех вариантов оказывается невозможным. Это требует разработки специализированных математических методов для поиска и сужения множества Парето-оптимальных решений. В данной работе предлагается модификация метода TOPSIS для применения его с бесконечными альтернативами.

В контексте теории принятия решений альтернатива представляет собой один из возможных вариантов действия, доступных лицу, принимающему решение (ЛПР). Когда множество альтернатив является бесконечным, задача принятия решений трансформируется в задачу математической оптимизации, где решение описывается непрерывными параметрами. Такие задачи характерны для проектирования сложных технических систем, управления технологическими процессами и экономического моделирования.

Рассмотрим существующие методы скаляризации и проблемы корректности для бесконечных множеств. Линейная свертка критериев (взвешенная сумма критериев) – один из наиболее популярных методов сведения многокритериальной задачи к однокритериальной. Однако, как показано в ряде работ [14, 15], область осмысленного применения линейной свертки уже, чем принято считать. Метод является строго обоснованным только в двух случаях: когда отношение предпочтения ЛПР может быть точно представлено линейной функцией полезности или когда множество достижимых векторов является выпуклым. Для невыпуклых множеств метод линейной свертки не позволяет найти все эффективные решения, «пропуская» значительную их часть, что делает его неприменимым в общем случае.

Для преодоления ограничений линейной свертки применяются иные методы скаляризации. Минимум-Максимум функция – универсальна и работает для любых форм Парето-фронта, гарантирует нижнюю оценку для всех критериев. Штрафная функция – фокусируется на одном случайно выбранном критерии на шаге поиска, накладывая штрафы на отклонения других критериев от текущих значений, – также отличается универсальностью.

Также существуют прямые методы поиска в многокритериальном пространстве. Для непосредственного поиска в непрерывных пространствах широко применяются методы, не требующие вычисления производных. Метод Нелдера – Мида (метод деформируемого многогранника) представляет собой метод безусловной оптимизации, не использующий градиентов [16]. Его основная идея заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса вокруг точки экстремума. Это делает его полезным для работы с негладкими и зашумленными функциями. В многокритериальной оптимизации он часто используется для адаптивного поиска оптимальных весов в процедуре скаляризации. Адаптивный случайный поиск

(АСП) выступает альтернативой для сложных задач, где метод Нелдера – Мида может «застревать» в локальных минимумах [17]. АСП, комбинируясь со скалярными функциями агрегирования, позволяет эффективно аппроксимировать все множество Парето даже для негладких и мультимодальных функций.

Существуют комбинированные подходы, помогающие сузить множества Парето. Для преодоления ограничений простых методов скаляризации предлагаются комбинированные подходы. В работе [18] предлагается двухэтапный метод. На первом этапе используется аксиоматический подход, основанный на сборе «квантов информации» от ЛПР, что позволяет построить новый векторный критерий и существенно сузить исходное множество Парето. На втором этапе к уже суженному множеству применяется линейная или мультипликативная свертка для окончательного выбора. Такой подход минимизирует риск ошибки, присущий «слепому» применению сверток ко всему множеству, и делает решение более обоснованным для задач с бесконечными альтернативами.

Анализ последних исследований показывает, что задачи с бесконечными альтернативами в теории принятия решений требуют комплексного подхода. Прямые методы поиска, такие как АСП и Нелдер – Мид, позволяют эффективно аппроксимировать множество Парето в сложных непрерывных пространствах. Однако ключевой вызов заключается в корректном сужении этого множества и выборе итогового решения. Критический анализ линейной свертки демонстрирует ее ограниченную применимость, жестко зависящую от свойств множества Парето. Наиболее перспективными являются комбинированные подходы, которые на первом этапе используют аксиоматические методы для сужения множества на основе информации о предпочтениях ЛПР и лишь на втором применяют стандартные процедуры скаляризации. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка гибридных алгоритмов, сочетающих достоинства прямых методов оптимизации с возможностями

ми современных метаэвристических методов и методов учета предпочтений ЛПР.

Рассмотрим m -критериальную задачу принятия решений. Пусть

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (1)$$

является конечным множеством альтернатив, на котором определены m скалярных функций $f_1, f_2, \dots, f_m$, называемых критериями.

Задача ЛПР состоит в выборе альтернативы $A \in X$, при которой все m критериев f_j примут по возможности большие значения.

Стоит отметить, что достаточно часто, выбирая решение, ЛПР может стремиться уменьшить значение части критериев. Так, например, оптимизируя процесс производства, ЛПР может не только обеспечить максимальный объем выпускаемой продукции, но одновременно с этим минимизировать долю брака. Отметим, что, заменив в такой задаче минимизируемые целевые функции на противоположные, всегда можно получить равносильную задачу (1), в которой уже все функции нужно максимизировать.

Задачу можно отождествить с матрицей решений $F = [f_j(x_i)]_{n \times m}$, где элемент x_{ij} матрицы F совпадает со значением критерия f_j при выборе ЛПР альтернативы A_i . В такой задаче выбор ЛПР некоторой альтернативы означает выбор соответствующей строки матрицы F .

Под решениями задачи (1) обычно понимают [8] векторные максимумы. Одним из них является максимум по Парето.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод TOPSIS

Также рассмотрим метод TOPSIS [3]. Основная концепция этого метода заключается в том, что выбранная альтернатива должна иметь наименьшее расстояние от идеального решения и наибольшее расстояние от отрицательно идеального решения в некотором геометрическом смысле.

Метод TOPSIS предполагает, что каждый критерий имеет тенденцию к монотонно увеличивающейся или уменьшающейся полезности. Поэтому легко определить идеальные и отрицательно-идеальные решения.

Для оценки относительной близости альтернатив к идеальному решению был предложен подход с использованием евклидова расстояния. Таким образом, порядок предпочтения альтернатив может быть получен путем серии сравнений этих относительных расстояний.

Метод TOPSIS оценивает следующую матрицу решений, относящуюся к m альтернативам, которые оцениваются с точки зрения n критериев:

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix},$$

где x_{ij} обозначает показатель эффективности i -й альтернативы в терминах j -го критерия.

Далее представлены этапы метода TOPSIS.

Этап 1: Построение нормализованной матрицы решений.

Метод TOPSIS сначала преобразует различные измерения критериев в безразмерные критерии. Таким образом, элемент нормализованной матрицы решений r_{ij} вычисляется следующим образом:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}.$$

Этап 2: Постройте Взвешенную нормализованную матрицу решений.

Набор весов $W=(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$, $\sum w_i=1$, определенный лицом, принимающим решения, используется с матрицей решений для генерации взвешенной нормализованной матрицы V следующим образом:

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & w_3 r_{13} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & w_3 r_{23} & \dots & w_n r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & w_3 r_{m3} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}.$$

Умножается вес критериев на элементы критерия из нормализованной матрицы принятия решений.

Этап 3: Определите Идеальное и Отрицательно-Идеальное решения.

Идеал, как и отрицательный идеал, обозначаемый как A^- альтернативы (решения) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{u_{ij}^+, \dots, u_{jn}^+\} = \{(\max_i u_{ij} | j \in J), \\ &(\min_i u_{ij} | j \in J), i=1, 2, \dots, m\} = \{u_{1+}, u_{2+}, \dots, u_{n+}\}, \\ A^- &= \{u_{ij}^-, \dots, u_{jn}^-\} = \{(\min_i u_{ij} | j \in J), \\ &(\max_i u_{ij} | j \in J), i=1, 2, \dots, m\} = \{u_{1-}, u_{2-}, \dots, u_{n-}\}, \end{aligned}$$

где:

$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\}$, и j связан с критериями выгоды.

$J' = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\}$, и j связан с критериями затрат/потерь.

Из предыдущих определений следует, что альтернатива A^+ указывает на наиболее предпочтительную альтернативу или идеальное решение. Аналогично альтернатива A^- указывает на наименее предпочтительную альтернативу или отрицательно-идеальное решение.

Идеальное решение вычисляется следующим образом. Для положительных качеств берется максимальное значение во всем столбце критериев, для отрицательных – минимальное.

Отрицательно-Идеальное решение вычисляется похоже, только для положительных качеств берется минимальное значение во всем столбце критериев, для отрицательных – максимальное.

Этап 4: Рассчитайте меру разделения.

Затем применяется метод n -мерного евклидова расстояния для измерения расстояний, отделяющих каждую альтернативу от идеального решения и отрицательно-идеального решения. Таким образом, для расстояний от идеального решения получится следующее уравнение:

$$S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_{j+})^2}, \text{ для } i = 1, 2, 3, \dots, m,$$

где S_{i+} – расстояние (в евклидовом смысле) каждой альтернативы от идеального решения.

Аналогично для расстояний от отрицательно-идеального решения мы имеем:

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_{j-})^2}, \text{ для } i = 1, 2, 3, \dots, m,$$

где S_{i-} – расстояние (в евклидовом смысле) каждой альтернативы от решения с отрицательным идеалом.

Этап 5: Рассчитайте относительную близость к идеальному решению.

Относительная близость альтернативного A_i по отношению к идеальному решению A^+ определяется следующим образом:

$$C_{i*} = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}}, \quad (2)$$

где $1 \geq C_{i*} \geq 0$ и $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Этап 6: Ранжируйте порядок предпочтений.

Наилучшая (оптимальная) альтернатива теперь может быть определена в соответствии с порядком ранжирования предпочтений C_{i*} . Поэтому лучшей альтернативой является та, которая имеет наименьшее расстояние до идеального решения. Предыдущее определение также может быть использовано для демонстрации того, что любая альтернатива, имеющая наименьшее расстояние от идеального решения, также гарантированно будет иметь наибольшее расстояние от отрицательно идеального решения.

Модификация методов

Будем теперь считать, что, планируя применить метод TOPSIS, ЛПР выбирает не точные значения весов, а некоторые промежутки, которым эти веса принадлежат.

Предполагается, что вес w_j может быть задан либо числом γ_j (фиксированный вес), либо интервалом, где $[\alpha_j, \beta_j]$ ($j = 1, \dots, m$), $0 \leq \alpha_j \leq \beta_j$, то есть:

$$w_j \in \{\gamma_j | 0 \leq \alpha_j \leq \beta_j\}.$$

Другими словами, набор весов $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ представляет собой интервальную неопределенность [19]. Множество таких неопределенностей обозначим:

$$W = W_1 \times W_2 \times \dots \times W_m \subset \mathbb{R}^m,$$

где $W_j = [\alpha_j, \beta_j]$ ($j = 1, \dots, m$), для интервальных весов, а для фиксированных примет следующий вид: $W_j = \gamma_j$ ($j = 1, \dots, m$).

Для корректной работы алгоритма необходимо, чтобы существовал хотя бы один вектор весов, удовлетворяющий этим условиям. Это выполняется, если сумма всех фиксированных весов и минимальных интервальных весов не превышает 1, а сумма фиксированных весов и максимальных интервальных весов не меньше 1:

$$\sum_{j \in J} \gamma_j + \sum_{j \in K} \alpha_j \leq 1 \leq \sum_{j \in J} \gamma_j + \sum_{j \in K} \beta_j,$$

где J – множество индексов фиксированных весов, K – множество индексов интервальных весов.

Поскольку веса в методе TOPSIS должны быть нормированы, их сумма равна единице. Множество всех допустимых векторов весов представляет собой пересечение m -мерного гиперпараллелепипеда $W = [\alpha_1, \beta_1] \times [\alpha_2, \beta_2] \times \dots \times [\alpha_m, \beta_m]$ при наличии только интервальных весов и $W = [\alpha_1, \beta_1] \times \gamma_2 \times \dots \times [\alpha_m, \beta_m]$, если некоторые веса заданы фиксированно.

Меру множества W будем обозначать S_w , а именно:

$$S_w = W \cap T,$$

где $T = \{(w_1, \dots, w_m) | w_j \geq 0, \sum_{j=1}^m w_j = 1\}$.

Будем предполагать, что S_w не пусто. Мера Лебега [20] не подойдет, потому что если некоторые веса заданы точно (фиксированные), например $w_1 = 0,4$, то множество допустимых весов имеет меньшую размерность, чем все пространство весов.

В качестве меры будем использовать нормированную меру Лебега, полагая, что она должна быть равна единице. В случае когда множество S_w состоит из конечного числа точек, например когда некоторые веса заданы точно, в качестве меры множества S_w используется считающая мера, также отнормированная к единице.

Далее для каждой альтернативы A_i ($i = 1, \dots, n$) обозначим через $W(A_i)$ множество всех векторов весов $w \in W$, для которых A_i имеет максимальный оценочный балл C_{i*} (вычисленный по формуле (2)) среди всех альтер-

натив. Ниже $S_w(A_i)$ означает нормированную меру множества $W(A_i)$, а вероятностная мера на множестве допустимых векторов весов имеет вид:

$$\mu(A_i) = \frac{S_w(A_i)}{S_w}. \quad (3)$$

Очевидно, что поскольку множество альтернатив конечно, то хотя бы для одной альтернативы A_i ее мера $S_w(A_i)$, а следовательно, и величина $\mu(A_i)$ будут отличны от нуля.

Определение 1. Мягким TOPSIS-решением многокритериальной задачи принятия решений с интервальными весами будем называть множество

$$\tilde{A}^{TOPSIS} = \left\{ \frac{\mu(A_i)}{A_i} \mid \forall A_i (i = 1, \dots, n) : \mu(A_i) > 0 \right\},$$

где $\mu(A_i)$ является функцией принадлежности альтернативы A_i и определяется в (3).

Смысл определения 1 в том, что в мягкое TOPSIS-решение входят все те альтернативы, которые являются TOPSIS-решениями. Также оно показывает, для какой доли (вероятности в рамках равномерной модели) всех допустимых векторов весов альтернатива оказывается наилучшей. При этом альтернативы, являющиеся TOPSIS-решениями на множестве меры ноль, в мягкого TOPSIS-решение не попадают. Это гарантирует исключение «неустойчивых» альтернатив из решения.

Для построения мягкого TOPSIS-решения будем придерживаться следующего алгоритма.

1) Выполняем шаги 1–6 алгоритма TOPSIS.

2) Для каждого набора весов $w \in W$ определяем альтернативу A_i , имеющую максимальный оценочный балл C_{i*} (вычисленный по формуле (2)) среди всех альтернатив.

3) Вычисляем S_w и $S_w(A_i)$ ($i=1, \dots, n$).

4) Используя формулу (3), строим решение $\tilde{A}^{TOPSIS}$.

При прохождении пунктов 2) и 3) приходится использовать численные методы. Здесь при построении численных алгоритмов можно использовать как постоянную сетку (при небольшом количестве критериев), так и метод Монте-Карло. Затем в качестве приближенного значения функции принадлежности

(3) можно для каждой альтернативы A_i взять отношение количества узлов, в которых A_i была лучшей по значению AS альтернативы, к общему числу узлов, в которых проводились вычисления.

Модификация метода TOPSIS для работы с непрерывными альтернативами

Для решения задачи (1) сформулируем непрерывный аналог метода TOPSIS. Изменение в алгоритме метода TOPSIS можно описать следующими шагами.

Шаг 1. На первом этапе определяются критерии и альтернативы задачи принятия решения.

Шаг 2. Затем строится N -вектор-функция

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)),$$

где x – альтернатива $x \in X$, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x \in \mathbb{R}^n$, j – критерий (функция $f_j(x)$) $X = (f_1(x), \dots, f_m(x))$ $x_{ij} = f_j(x_i)$.

В дискретном случае i – альтернатива $i = 1, n$ (строка), j – критерий (столбец) $j = 1, m$. В дискретном случае в матрице x_{ij} указывает значение эффективности i -й альтернативы на основе j -го критерия.

Шаг 3. Построение нормализованного решения.

Метод TOPSIS сначала преобразует различные измерения критериев в безразмерные критерии. Таким образом, элемент r_j вычисляется следующим образом:

$$r_j = \frac{f_j(x)}{\sqrt{\int_x f_j(x)^2 dx}}.$$

Шаг 4. Построение взвешенного нормализованного решения.

Набор весов $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$, где $\sum w_i = 1$, определенный лицом, принимающим решения, для расчета взвешенного нормализованного решения следующим образом:

$$r_j(x) = w_j r_j.$$

Шаг 5: Нахождение Идеального и Отрицательно-Идеального решения.

Идеал, обозначаемый как A_j^+ , и Отрицательный идеал, обозначаемый как A_j^- , альтер-

нативы (решения) определяются следующим образом:

$$A_j^+ = \{f_j^+(x)_1, \dots, f_j^+(x)_n\} = \\ = \{(\max_{j \in J} f_j(x) \mid j \in J^+)\} = \\ = \{r_{1+}(x), r_{2+}(x), \dots, r_{n+}(x)\},$$

$$A_j^- = \{f_j^-(x)_1, \dots, f_j^-(x)_n\} = \\ = \{(\min_{j \in J} f_j(x) \mid j \in J^-)\} = \\ = \{r_{1-}(x), r_{2-}(x), \dots, r_{n-}(x)\},$$

где:

$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\}$, и j связан с критериями выгоды.

$J^- = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\}$, и j связан с критериями затрат/потерь.

В зависимости от критерия нужно брать минимум или максимум по функциям (столбцу). Если критерий отрицательный, то A_j^+ будет минимумом функции, а A_j^- – максимумом функции. Если критерий положительный, то A_j^+ будет максимумом функции, а A_j^- – минимумом функции.

Из предыдущих определений следует, что альтернатива A_j^+ указывает на наиболее предпочтительную альтернативу, или Идеальное решение. Аналогично, альтернатива A_j^- указывает на наименее предпочтительную альтернативу, или Отрицательно-Идеальное решение.

Шаг 6: Расчет меры разделения.

Затем применяется метод n -мерного евклидова расстояния для измерения расстояний, отделяющих каждую альтернативу от Идеального решения и Отрицательно-Идеального решения. Таким образом, для расстояний от Идеального решения получится следующее уравнение:

$$S_+(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_j(x) - A_j^+)^2},$$

где S_+ – расстояние (в евклидовом смысле) каждой альтернативы от Идеального решения.

Аналогично, для расстояний от Отрицательно-Идеального решения мы имеем:

$$S_-(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_j(x) - A_j^-)^2},$$

где S_- – расстояние (в евклидовом смысле) каждой альтернативы от Отрицательно-Идеального решения.

Шаг 7: Расчет относительной близости к Идеальному решению.

$$C_*(x) = \frac{S_-(x)}{S_+(x) + S_-(x)},$$

где $x^* = \arg \max C_*(x)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Задача составления оптимальной рецептуры

В свете растущей актуальности рационального питания для здоровья населения и преодоления глобальных вызовов исследования природных ресурсов как основы оптимизации диет приобретают ключевое значение.

Рассматривается рецепт из пяти видов ягод (земляника садовая, крыжовник розовый, малина, смородина красная, жимолость), характеризующийся содержанием четырех минералов (кальций, калий, магний, фосфор) и показателем нерастворимых пищевых волокон (на 100 г). Требуется определить пропорции ягод, минимизирующие содержание волокон при одновременной максимизации концентраций Ca, K, Mg и P, с соблюдением двух ограничений:

1. Соотношение $(Ca^{+2} : Mg^{+2} = 2 : 1)$.

2. Соотношение $(Ca^{+2} : P^{+3} = 1 : 1)$.

Для полученной оптимальной смеси необходимо указать количественное содержание остальных минеральных элементов.

Биохимические показатели ягод приведены в табл. 1, а минеральные составы ягод, рассматриваемые в этой задаче, в табл. 2.

Поскольку по условиям задачи требуется минимизировать первую, шестую и седьмую функции, а максимизировать – вторую, третью, четвертую и пятую, то при определении состава смеси следует учесть эти требования. ЛПР оценил важность критериев следующими интервальными весами:

$$w_1 = [0.04, 0.61], w_2 = [0.04, 0.61], \\ w_3 = [0.15, 0.88], w_4 = [0.04, 0.61], \\ w_5 = [0.04, 0.61], w_6 = [0.05, 0.88],$$

$$w_7 = [0.05, 0.88]. \quad (4)$$

В виде уравнений поставленная задача имеет следующий вид:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

f_1 – нерастворимые пищевые волокна $\rightarrow \min$,

f_2 – кальций Ca $\rightarrow \max$,

f_3 – калий K $\rightarrow \max$,

f_4 – магний Mg $\rightarrow \max$,

f_5 – фосфор P $\rightarrow \max$,

$f_6 = (\text{Ca} - 2 \cdot \text{Mg})^2 \rightarrow \min$,

$f_7 = (\text{Ca} - \text{P})^2 \rightarrow \min$.

Распишем функции:

$$f_1 = 2,1x_1 + 2,3x_2 + 4,9x_3 + 3x_4 + \\ + 2,1(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4).$$

$$f_2 = 486,1x_1 + 211,2x_2 + 167x_3 + \\ + 136,3x_4 + 89,3(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4).$$

$$f_3 = 2143,3x_1 + 1258,4x_2 + 813,1x_3 + 967,2x_4 + \\ + 1140,1(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4).$$

$$f_4 = 120,3x_1 + 76,1x_2 + 132,3x_3 + 98,54x_4 + \\ + 39,41(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4).$$

$$f_5 = 264,2x_1 + 416x_2 + 415,3x_3 + 347,1x_4 + \\ + 212(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4).$$

$$f_6 = (245,5x_1 + 59x_2 - 97,6x_3 - 60,78x_4 + \\ + 10,48(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4))^2.$$

$$f_7 = (221,9x_1 - 204,8x_2 - 248,3x_3 - \\ - 210,8x_4 - 122,71(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4))^2.$$

f_6 и f_7 задаются в виде квадрата невязок: для $\text{Ca}^{+2} : \text{Mg}^{+2} = 2:1$

$$f_6(x) = q_1(x) = f_2(x_1) - 2f_4(x_1),$$

для

$$f_7(x) = q_2(x) = f_2(x_1) - 2f_5(x_1).$$

Ограничения следующие:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^5 x_i = 1.$$

Продукты, входящие в состав:

$$x_1, \dots, x_n,$$

которые образуют $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор столбец.

Также существует условие того, что рецептура находится на стандартном симплексе:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i = 1, \\ x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (5)$$

при $(i = \overline{1, n})$. Будем называть вектор $\tilde{x}$ рецептом, если выполнено условие (5).

Минералы и полезные вещества, которые содержатся в продуктах, запишем в виде матрицы:

$$A_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

где A_i – i -я строка матрицы A . Точнее говоря, $A_i = (a_{i1}, \dots, a_{in})$, а a_{ij} – количество элемента i в продукте j при $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n})$.

Требуется найти рецепт $\tilde{x}$, при котором будут получаться максимальные или минимальные количества некоторых веществ. Множество номеров таких веществ обозначим $I_{\max}$ и $I_{\min}$ соответственно. Иными словами:

$$f_i(x) = \sum_j a_{ij} x_j \rightarrow \max \quad (i \in I_{\max}), \quad (6)$$

$$f_i(x) = \sum_j a_{ij} x_j \rightarrow \min \quad (i \in I_{\min}). \quad (7)$$

При этом требуется по возможности выдерживать соотношения q между веществами типа:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = k_p \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (8)$$

при $(p = 1, \dots, q)$. И соотношение коэффициент пропорциональности k_p равняется:

$$k_p = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} x_i}{\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j}.$$

Система (5)–(8), как правило, несовместна. Поэтому будем стараться по возможности выдерживать соотношения (6)–(7). Для этого введем следующие функции:

$$q_p(x) = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - k_p \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right)^2$$

при $(p = \overline{1, q})$.

Эти функции характеризуют «невязки» между элементами и получившимися соотношениями.

Невязки нужны, чтобы контролировать пропорции веществ в смеси. Они позволяют количественно оценить, насколько фактическое соотношение компонентов отличается от запланированного.

Если невязка равна 0, соотношение соблюдено идеально. Положительная невязка означает избыток одного компонента. Отрицательная невязка означает недостаток одного компонента, что эквивалентно избытку другого.

Квадрат невязки $q_p(x)$ – это просто невязка, возведенная в квадрат. Она нужна, чтобы функцию представить в виде квадратичной функции, которая гладкая и легко дифференцируема, что критически важно для методов оптимизации.

Будем подбирать рецептуру так, чтобы, с одной стороны, были выполнены требования (6)–(7), с другой стороны – требования:

$$q_p(x) \rightarrow \min. \quad (9)$$

И при этом должны выполняться ограничения (5). Задачу (5), (6)–(7), (9) назовем задачей составления рецептуры с учетом квадратов невязок. Эта задача представляет собой многокритериальную задачу принятия решений на стандартном симплексе.

В используемой далее вычислительной процедуре при нахождении (3) величина S_w использоваться не будет. Вместо этого для вычисления значений функции принадлежности $\mu(A_i)$ используем вместо сетки с постоянным шагом метод Монте-Карло. При каждом наборе весов в узлах сетки получаем решение задачи A_i из множества решений, при этом обновляем множество $W(A_i)$, добавляя в него рассматриваемый узел сетки. Затем для каждого решения A_i будем считать

$$\mu(A_i) = \frac{K(A_i)}{K},$$

где $K(A_i)$ – количество элементов в множестве, $W(A_i)$ а K – общее число узлов сетки.

Рассмотрим решение задачи на первой итерации используя модифицированный метод TOPSIS для непрерывного случая. Веса для рассматриваемого примера возьмем равным одному. На шаге 3 интеграл для первой функции нормализованного решения примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \int_x f_1(x)^2 dx &= \int_0^1 \int_0^{1-x_1} \int_0^{1-x_1-x_2} \int_0^{1-x_1-x_2-x_3} \\ f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, 1-x_1-x_2-x_3-x_4)^2 dx_4 dx_3 dx_2 dx_1 &= \\ &= \int_0^1 \int_0^{1-x_1} \int_0^{1-x_1-x_2} \int_0^{1-x_1-x_2-x_3} \\ &\quad (2,1x_1 + 2,3x_2 + 4,9x_3 + 3x_4 + \\ &\quad + 2,1(1-x_1-x_2-x_3-x_4))^2 dx_4 dx_3 dx_2 dx_1. \end{aligned}$$

А само нормализованное решение для первой функции получится следующим:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{f_1(x)}{\sqrt{\int_x f_1(x)^2 dx}} = \\ &= 0,5774x_2 + 8,0829x_3 + 2,5981x_4 + 6,0622. \end{aligned}$$

На шаге 4 взвешенное нормализованное решение для первой функции получится следующим:

$$r_1(x) = 1 \cdot 0,5774x_2 + 8,0829x_3 + 2,5981x_4 + 6,0622.$$

На шаге 5 находим Идеальное и Отрицательно-Идеальное решения для первой функции. Чтобы это сделать, нужно найти максимум и минимум для каждой рассматриваемой функции в задаче. Для этого будем использовать методы роя частиц [21] и субградиентный метод МА(ak) [22].

Решение, получившееся методом роя частиц, для первой функции:

$$\begin{aligned} \max_1 f_1(x) &= 14,145081595145829, \\ \min_1 f_1(x) &= 6,06217782649107. \end{aligned}$$

Решение, получившееся субградиентным методом МА(ak), для первой функции:

$$\max_1 f_1(x) = 14,145081595145829,$$

$$\min_1 f_1(x) = 6,06217782649107.$$

Далее в зависимости от критерия нужно для A_j^+ и A_j^- присвоить получившиеся экстремумы функций.

На шаге 6 мера разделения примет вид:

$$S_+(x) = 4649,6385 \sqrt{0,8841((x_1 - 0,2383x_2 - 0,3645x_3 - 0,2557x_4 - 0,3561)^2 - 3,3132 \cdot 10^{-10})^2 + \dots}$$

$$S_-(x) = 5073,5569 \sqrt{0,7425((x_1 - 0,2383x_2 - 0,3645x_3 - 0,2557x_4 - 0,3561)^2 - 0,5192)^2 + \dots}$$

На шаге 7 расчет относительной близости к Идеальному решению получается следующий:

$$C_*(x) = \frac{4649,6385 \sqrt{0,8841((x_1 - 0,2383x_2 - 0,3645x_3 - \dots - 0,3561)^2 - 3,3132 \cdot 10^{-10})^2 + \dots}}{5073,5569 \sqrt{0,7425((x_1 - 0,2383x_2 - 0,3645x_3 - \dots - 0,3561)^2 - 0,5192)^2 + \dots}}$$

$$x^* = \arg \max C_*(x).$$

Для поиска x^* нужно найти максимум функции $C^*(x)$. Для этого будем использовать методы роя частиц и субградиентный метод $MA(\alpha k)$. Для нахождения x_5 в рассматриваемых методах нужно из суммы получившихся найденных точек экстремума вычесть единицу.

Решение, получившееся методом роя частиц:

Максимальное значение функции:

$$x^* = 0,959467889429241.$$

Найденный максимум в точках:

$$[0,39928254, 0, 0,60071746, 0, 0].$$

Решение, получившееся субградиентным методом $MA(\alpha k)$:

Максимальное значение функции:

$$x^* = 0,959085743483797.$$

Найденный максимум в точках:

$$[0,39612851, 0, 0,55272025, 0, 0,05115125, 0].$$

Теперь возьмем для нашего примера веса (4). В рассмотренном примере общее число точек, в которых проводились вычисления, составило 100. Для поиска экстремума функции использовали метод роя частиц. В результате вычисления было получено нечеткое TOPSIS-решение

$$\tilde{A}^{TOPSIS} = \left\{ \frac{0,22}{x_1}, \frac{0}{x_2}, \frac{0,71}{x_3}, \frac{0,07}{x_4}, \frac{0}{x_5} \right\}.$$

Посчитаем получившиеся функции:

$$f_1 = 2,1 \cdot 0,22 + 2,3 \cdot 0 + 4,9 \cdot 0,7 + 3 \cdot 0,07 + 2,1 \cdot 0,$$

$$f_2 = 486,1 \cdot 0,22 + 211,2 \cdot 0 + 167 \cdot 0,71 + 136,3 \cdot 0,07 + 89,3 \cdot 0,$$

$$f_3 = 2143,3 \cdot 0,22 + 1258,4 \cdot 0 + 813,1 \cdot 0,71 + 967,2 \cdot 0,07 + 1140,1 \cdot 0,$$

$$f_4 = 120,3 \cdot 0,22 + 76,1 \cdot 0 + 132,3 \cdot 0,71 + 98,54 \cdot 0,07 + 39,41 \cdot 0,$$

$$f_5 = 264,2 \cdot 0,22 + 416 \cdot 0 + 415,3 \cdot 0,71 + 347,1 \cdot 0,07 + 212 \cdot 0,$$

$$f_1 = 4,10, f_2 = 235,05, f_3 = 1116,53,$$

$$f_4 = 127,30, f_5 = 377,29$$

и получившиеся соотношения:

$$q_1 = f_2 / f_4, q_2 = f_2 / f_5,$$

$$q_1 = 1,846426, q_2 = 0,622996.$$

Также приведем решение, получившееся, когда для поиска экстремума функции используется субградиентный метод $MA(\alpha k)$ вместо роя частиц.

В результате вычисления было получено сильное TOPSIS-решение:

$$A^{TOPSIS*} = x_1 = 1.$$

Посчитаем получившиеся функции:

$$f_1 = 2,1 \cdot 1 + 2,3 \cdot 0 + 4,9 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 2,1 \cdot 0,$$

$$f_2 = 486,1 \cdot 1 + 211,2 \cdot 0 + 167 \cdot 0 + 136,3 \cdot 0 + 89,3 \cdot 0,$$

$$f_3 = 2143,3 \cdot 1 + 1258,4 \cdot 0 + 813,1 \cdot 0 + 967,2 \cdot 0 + 1140,1 \cdot 0,$$

$$f_4 = 120,3 \cdot 1 + 76,1 \cdot 0 + 132,3 \cdot 0 + 98,54 \cdot 0 + 39,41 \cdot 0,$$

$$f_5 = 264,2 \cdot 1 + 416 \cdot 0 + 415,3 \cdot 0 + 347,1 \cdot 0 + 212 \cdot 0,$$

$$f_1 = 2,1, f_2 = 486,1, f_3 = 2143,3,$$

$$f_4 = 120,3, f_5 = 264,2$$

и получившиеся соотношения:

$$q_1 = f_2 / f_4, q_2 = f_2 / f_5,$$

$$q_1 = 0,017456, q_2 = 0,007949.$$

Чтобы посмотреть в получившейся смеси количество остальных минеральных элементов, нужно провести минеральный анализ получившейся оптимальной смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании предложена модификация метода TOPSIS для решения многокритериальных задач принятия реше-

ний в условиях неопределенности, когда веса критериев задаются в виде интервалов, а множество альтернатив является бесконечным (непрерывным). Введено новое понятие мягкого TOPSIS-решения, устойчивого к вариациям весовых коэффициентов в заданных пределах.

К числу основных преимуществ предложенного подхода относятся:

- Учет неопределенности предпочтений ЛПР – переход от точечных оценок весов к интервальным – позволяет ЛПР выражать свои предпочтения в менее строгой и более адекватной форме, что соответствует реальной практике принятия решений, когда точные количественные оценки важности критериев затруднительны. Этот подход может быть использован и в других конструктивных методах [23, 24], применяемых для выбора оптимальных альтернатив.

- Расширение области применения – адаптация метода TOPSIS для работы с непрерывными множествами альтернатив существенно расширяет класс решаемых задач, открывая возможности для применения в таких областях, как оптимизация рецептов, технологических процессов, проектирование сложных систем и параметрическая оптимизация.

- Практическая значимость: разработанный подход успешно апробирован на задаче оптимизации рецептуры многокомпонентной смеси, что демонстрирует его работоспособность и практическую применимость для решения реальных инженерных и производственных задач.

Однако предложенный метод имеет и определенные ограничения:

- Высокая вычислительная сложность. Необходимость многократного решения задач оптимизации для каждого набора весов из интервала в рамках процедуры Монте-Карло существенно увеличивает вычислительные затраты, особенно для задач высокой размерности.

- Зависимость от методов оптимизации. Точность и эффективность метода сильно зависят от используемых алгоритмов оптимизации (метод роя частиц, субградиентные методы), которые могут «застывать» в локальных экстремумах для сложных невыпуклых функций, что требует тщательного подбора и настройки алгоритмов.

- Сложность аналитического анализа. Для сложных критериев и ограничений аналитическое исследование свойств мягкого решения может быть затруднительно, что повышает зависимость от численных экспериментов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка более эффективных вычислительных алгоритмов, снижающих нагрузку за счет адаптивных стратегий и метаэвристики; адаптация метода для других классов многокритериальных задач, включая задачи с нечеткими интервалами; а также исследование возможностей комбинирования предложенного подхода с другими методами принятия решений в условиях неопределенности для построения гибридных моделей.

Список источников

1. Pradhan P., Shabbiruddin, Pradhan S. Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44, no. 2. P. 2651–2673. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2056665>.
2. Mehta P., Tandon A., Sharma H. Integration of FAHP and COPRAS-G for software component selection // *Optimization Models in Software Reliability* / Aggarwal A. G., Tandon A., Pham H., eds. Cham : Springer, 2022. P. 263–282. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78919-0_12.

References

1. Pradhan P., Shabbiruddin, Pradhan S. Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022;44(2):2651–2673. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2056665>.
2. Mehta P., Tandon A., Sharma H. Integration of FAHP and COPRAS-G for software component selection. In: Aggarwal A. G., Tandon A., Pham H., eds. *Optimization Models in Software Reliability*. Cham: Springer; 2022. p. 263–282. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78919-0_12.
3. Rani P., Mishra A. R., Mardani A. An extended Pythagorean fuzzy complex proportional assessment ap-

3. Rani P., Mishra A. R., Mardani A. An extended Pythagorean fuzzy complex proportional assessment approach with new entropy and score function: Application in pharmacological therapy selection for type 2 diabetes // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 94. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106441>.
4. Ozdagoglu A., Oztas G. Z., Keles M. K. et al. A comparative bus selection for intercity transportation with an integrated PIPRECIA & COPRAS-G // *Case Studies on Transport Policy*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 993–1004. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.012>.
5. Kaya S. K., Aycin E. An integrated interval type 2 fuzzy AHP and COPRAS-G methodologies for supplier selection in the era of Industry 4.0 // *Neural Computing and Applications*. 2021. Vol. 33. P. 10515–10535. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05809-x>.
6. Буховец В. А., Картавенко О. В., Тюрин П. О. и др. Оптимизация рецептуры методом регрессионного анализа // *Новые технологии / New technologies*. 2024. Т. 20, № 4. С. 11–21. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-4-11-21>.
7. Имангалиева Ж. К., Ибрагимов Н. К., Кожახиева М. О. и др. Оптимизация витаминного состава в творожных продуктах // *Механика и технологии*. 2024. № 3 (85). С. 40–46. <https://doi.org/10.55956/YUXY9855>.
8. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М. : Наука, 1982. 256 с.
9. Pavić Z., Novoselac V. Notes on TOPSIS Method // *International Journal of Research in Engineering and Science*. 2013. Vol. 1, no. 2. P. 5–12.
10. Alinezhad A., Khalili J. COPRAS method // *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)* / Price C. C., ed. Cham : Springer, 2019. Vol. 277. P. 87–91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9_12.
11. Keshavarz Ghorabae M., Amiri M., Zavadskas E. K. et al. Stochastic EDAS method for multi-criteria decision-making with normally distributed data // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2017. Vol. 33, no. 3. P. 1627–1638. <https://doi.org/10.3233/jifs-17184>.
12. Morais D. C., de Almeida A. T., Figueira J. R. A sorting model for group decision making: A case study of water losses in Brazil // *Group Decision and Negotiation*. 2014. Vol. 23, no. 5. P. 937–960. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9321-7>.
13. Llamazares B. Using interval weights in MADM problems // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 136. P. 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.035>.
14. Ногин В. Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2014. № 4. P. 73–82.
15. Кравцов М. К. Применение алгоритма линейной свертки критериев для нахождения эффективных решений в векторной задаче дискретной оптимизации с новой энтропией и функцией оценки: Применение в фармакологическом выборе терапии для типа 2 диабета. *Applied Soft Computing*. 2020;94. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106441>.
16. Ozdagoglu A., Oztas G. Z., Keles M. K. et al. A comparative bus selection for intercity transportation with an integrated PIPRECIA & COPRAS-G. *Case Studies on Transport Policy*. 2022;10(2):993–1004. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.012>.
17. Kaya S. K., Aycin E. An integrated interval type 2 fuzzy AHP and COPRAS-G methodologies for supplier selection in the era of Industry 4.0. *Neural Computing and Applications*. 2021;33:10515–10535. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05809-x>.
18. Bukhovets V. A., Kartavenko O. V., Tyurin P. O. et al. Recipe optimization using regression analysis method. *New technologies*. 2024;20(4):11–21. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-4-11-21>. (In Russ.).
19. Imangalieva Zh. K., Ibragimov N. K., Kozhakhieva M. O. et al. Optimization of vitamin composition in curd products. *Mechanics & Technologies*. 2024;(3):40–46. <https://doi.org/10.55956/YUXY9855>. (In Russ.).
20. Podinovskiy V. V., Nogin V. D. Pareto-optimalnye resheniya mnogokriterialnykh zadach. Moscow: Nauka; 1982. 256 p. (In Russ.).
21. Pavić Z., Novoselac V. Notes on TOPSIS Method. *International Journal of Research in Engineering and Science*. 2013;1(2):5–12.
22. Alinezhad A., Khalili J. COPRAS method. In: Price C. C., ed. *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)*. Cham: Springer; 2019. Vol. 277. p. 87–91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9_12.
23. Keshavarz Ghorabae M., Amiri M., Zavadskas E. K. et al. Stochastic EDAS method for multi-criteria decision-making with normally distributed data. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2017;33(3):1627–1638. <https://doi.org/10.3233/jifs-17184>.
24. Morais D. C., de Almeida A. T., Figueira J. R. A sorting model for group decision making: A case study of water losses in Brazil. *Group Decision and Negotiation*. 2014;23(5):937–960. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9321-7>.
25. Llamazares B. Using interval weights in MADM problems. *Computers & Industrial Engineering*. 2019;136:345–354. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.035>.
26. Nogin V. D. Linear scalarization in multi-criterion optimization. *Scientific and Technical Information Processing*. 2014;(4):73–82. (In Russ.).
27. Kravtsov M. K. Application of linear convolution criteria algorithm for finding effective solutions in vector problem of discrete optimization. *Ekonomika, modelirovanie, prognozirovanie*. 2021;(15):123–138. (In Russ.).
28. Chernorutskiy I. G. Metody prinyatiya resheniy. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2012. p. 132–135. (In Russ.).

- зации // Экономика, моделирование, прогнозирование. 2021. № 15. С. 123–138.
16. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. С. 132–135.
17. Абакаров А. Ш., Сушков Ю. А. О численном подходе к получению Парето-оптимальных альтернатив // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. № 5.
18. Ногин В. Д. Комбинированный подход к сужению множества Парето с использованием линейной и мультипликативной сверток критериев // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 2. С. 70–77.
19. Жуковский В. И., Кудрявцев К. Н. Уравновешивание конфликтов при неопределенности. I. Аналог седловой точки // Математическая Теория Игр и её Приложения. 2013. Т. 5, № 1. С. 27–44.
20. Халмош П. Теория меры / пер. с англ. М. : Рипол Классик. 2013, 298 с.
21. Marini F., Walczak B. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2015. Vol. 149. Pt. B. P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.08.020>.
22. Tovbis E., Krutikov V., Stanimirović P. et al. A family of multi-step subgradient minimization methods // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, no. 10. <https://doi.org/10.3390/math11102264>.
23. Kudryavtsev K., Simakov P. The COPRAS method with interval weights // *Proceedings of the 24th International Conference “Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies”*, November 18–21, 2024, Nizhni Novgorod, Russia / Balandin D., Barkalov K., Meyerov I., eds. Cham : Springer, 2025. Vol. 2363. P. 136–144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80457-1_10.
24. Симаков П. К. Метод TOPSIS с интервальными весами // *Системы управления и информационные технологии*. 2025. № 2 (100). С. 94–99.
17. Abakarov A. Sh., Sushkov Yu. A. O chislennom podkhode k polucheniyu Pareto-optimalnykh alternativ. *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2008;(5). (In Russ.).
18. Nogin V. D. A combined approach to reducing the Pareto set using linear or multiplicative scalarization. *Scientific and Technical Information Processing*. 2016;(2):70–77. (In Russ.).
19. Zhukovskiy V. I., Kudryavtsev K. N. Equilibrating conflicts under uncertainty. Analogue of a saddle-point. *Matematicheskaya Teoriya Igr i ee Prilozheniya*. 2013;5(1):27–44. (In Russ.).
20. Halmos P. R. Measure theory. Vasilkov D. A. Trans. Fomin S. V. ed. Moscow: Ripol Klassik; 2013. 298 p. (In Russ.).
21. Marini F., Walczak B. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2015. Vol. 149. Pt. B. p. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.08.020>.
22. Tovbis E., Krutikov V., Stanimirović P. et al. A family of multi-step subgradient minimization methods. *Mathematics*. 2023;11(10). <https://doi.org/10.3390/math11102264>.
23. Kudryavtsev K., Simakov P. The COPRAS method with interval weights. In: Balandin D., Barkalov K., Meyerov I., eds. *Proceedings of the 24th International Conference “Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies”*, November 18–21, 2024, Nizhni Novgorod, Russia. Cham: Springer; 2025. Vol. 2363. p. 136–144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80457-1_10.
24. Simakov P. K. Metod TOPSIS s intervalnymi vesami. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2025;(2):94–99. (In Russ.).

Информация об авторе

П. К. Симаков – инженер, аспирант;
<https://orcid.org/0009-0008-4844-0378>,
pavelsimakov35707@gmail.com

About the author

P. K. Simakov – Engineer, Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0008-4844-0378>,
pavelsimakov35707@gmail.com

Научная статья

УДК: 621.1.016.7+536.24

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-8>



Математическое моделирование теплообмена двухступенчатого вращающегося цилиндра

Николай Николаевич Синицын^{1,2}, Юлия Владимировна Грибкова²✉, Ирина Анатольевна Сарычева², Наталия Владимировна Запатрина², Елена Викторовна Голицына², Ольга Сергеевна Разинкова¹

¹Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

²Военный университет радиоэлектроники, Череповец, Россия

Аннотация. Поставлена задача расчета прогрева и охлаждения двухступенчатого вращающегося цилиндра в установке сухой грануляции жидкого доменного шлака. Построена математическая модель для решения задачи, а также разработан алгоритм расчета температурного поля вращающегося двухступенчатого цилиндра при интенсивном обогреве торца цилиндра и охлаждении боковых поверхностей. Математическую модель предполагается использовать для компьютерной оптимизации технологических параметров процесса прогрева и двухступенчатого цилиндра охлаждения при выдаче исходных данных при проектировании распыливающего диска, установленного на валу, для установки сухой грануляции жидкого доменного шлака.

Ключевые слова: двухступенчатый цилиндр, торцевой обогрев, охлаждение с боковых поверхностей, жидкий шлак, нестационарное уравнение теплопроводности, двумерное температурное поле, метод дробных шагов

Для цитирования: Синицын Н. Н., Грибкова Ю. В., Сарычева И. А., Запатрина Н. В., Голицына Е. В., Разинкова О. С. Математическое моделирование теплообмена двухступенчатого вращающегося цилиндра // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 84–92. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-8>.

Original article

Mathematical modeling of heat exchange in two-stage rotating cylinder

Nikolay N. Sinitsyn^{1,2}, Yuliya V. Gribkova²✉, Irina A. Sarycheva², Nataliya V. Zapatrina², Elena V. Golitsyna², Olga S. Razinkova¹

¹Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

²Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

Abstract. The paper considers calculating the heating and cooling of a two-stage rotating cylinder in a dry granulation unit for liquid blast furnace slag. In order to address the issue, the authors develop a mathematical model and an algorithm for estimating the temperature field of the two-stage rotating cylinder upon intense end heating and lateral surface cooling. The study proposes the implementation of the numerical scheme with set initial data in computer optimization of the cylinder's heat exchange parameters when designing a shaft disk atomizer of the aforementioned unit.

Keywords: two-stage cylinder, end heating, lateral surface cooling, liquid slag, unsteady-state equation of thermal conductivity, two-dimensional temperature field, fractional step method

For citation: Sinitsyn N. N., Gribkova Yu. V., Sarycheva I. A., Zapatrina N. V., Golitsyna E. V., Razinkova O. S. Mathematical modeling of heat exchange in two-stage rotating cylinder. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):84–92. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-8>.

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается математическая модель для расчета температурного поля во вращающемся цилиндрическом теле переменного сечения. Разработанная модель позволяет рассчитывать температурное поле при интенсивном торцевом обогреве и охлаждении боковых поверхностей распыливающего диска, вращающегося на валу.

Сухая грануляция жидкого доменного шлака, информация о которой изложена в статьях [1–6], исключает образование сернистых соединений (сероводород и др.), загрязняющих окружающую среду. Полученные гранулы доменного шлака удобно использовать в промышленности, особенно в производстве изоляционных и строительных материалов, в том числе цемента [7]. Выход жидкого доменного шлака из доменной печи составляет 0,3–0,6 тонны на 1 тонну чугуна. Он имеет температуру порядка 1400–1550 °С и содержит физическую теплоту 1,6–1,7 МДж/кг [8–11]. Температура начала затвердевания шлака $T_n = 1350$ °С, температура окончания затвердевания шлака $T_c = 1165$ °С [12].

В литературных источниках не всегда прослеживается достаточная оценка реальной технической возможности сухой грануляции жидкого доменного шлака в доменном производстве. Наиболее полная оценка приведена в работе [3], в которой отражено решение проблемы сухой грануляции шлака с утилизацией энергии, а также выполнено построение пилотной установки. Самым теплонапряженным элементом установки является распыливающий диск. В данной работе поставлена задача моделирования температурного поля во вращающемся распыливающем диске при изменении интенсивности температурных режимов обогрева и охлаждения цилиндрического тела.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. На рис. 1 представлена схема установки сухой грануляции жидкого доменного шлака [12].

Жидкий шлак с температурой 1400–1550 °С по каналу 1 подается в установку на

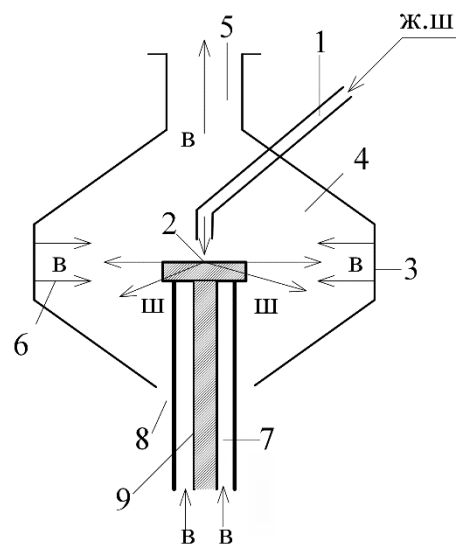


Рис. 1. Схема установки сухой грануляции жидкого доменного шлака: 1 – путь подачи жидкого шлака; 2 – вращающийся распыливающий диск; 3 – стенка грануляционной камеры; 4 – грануляционная камера; 5 – труба выхода горячего воздуха; 6 – направление подачи холодного воздуха; 7 – подача холодного воздуха на охлаждение диска 2 и вала 9; 8 – канал удаления затвердевшего шлака; 9 – вал; в. – воздух; ж. ш. – жидкий шлак; ш. – капли жидкого шлака

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

вращающийся с большой скоростью диск 2. Образующиеся при этом капли попадают во встречный поток воздуха 6. При этом в грануляционной камере 4 до столкновения со стенкой 3 капли шлака должны охладиться до температуры ниже температуры плавления. Незначительная часть холодного воздуха по каналу 7 идет на охлаждение диска 2 и вала 9.

Схема для расчета температурного поля в двухступенчатом цилиндре (диск 2 и вал 9) представлена на рис. 2.

Так как в поперечных сечениях двухступенчатого цилиндра температурное поле является осесимметричным, то нестационарная смешанная краевая задача теплопроводности в осевом сечении имеет следующий вид [13]:

$$\frac{\partial T(r; z; \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r; z; \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial T(r; z; \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r; z; \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

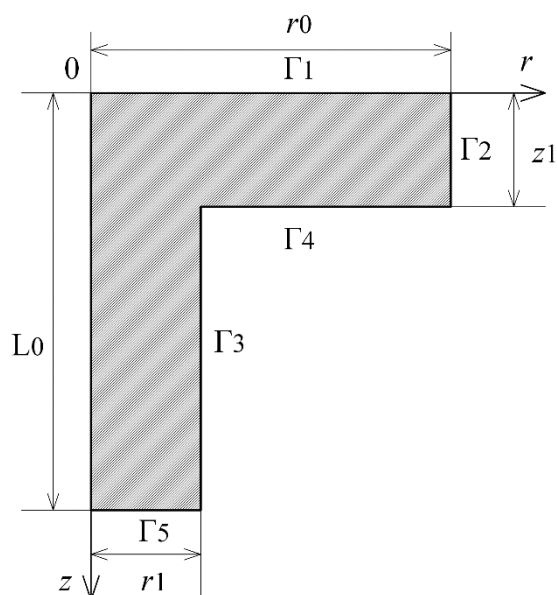


Рис. 2. Схема расчетной области:

Γ_1 – поверхность диска, контактирующая с жидким шлаком; Γ_2 – боковая поверхность диска; Γ_3 – боковая поверхность вала; Γ_4 – поверхность диска, охлаждаемая газом; Γ_5 – поверхность вала, охлаждаемая газом; ось O_z направлена по оси симметрии диска и вала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

$$0 \leq r \leq r_0; 0 \leq z \leq z_1; 0 \leq r \leq r_1; z_1 \leq z \leq L_0 - z_1; \\ 0 \leq \tau \leq \tau_k;$$

$$T(r, z; 0) = T^0;$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0;$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \alpha_2 (T(r, z; \tau) - T_{\text{ж}}) \Big|_{r=r_0};$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_3 (T(r, z; \tau) - T_{\text{ж}}) \Big|_{r=r_1};$$

$$\alpha_6 (T_4 - T(r, z; \tau)) \Big|_{z=0} = -\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0};$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial z} \Big|_{z=z_1} =$$

$$= \alpha_4 (T(r, z; \tau) - T_{\text{ж}}) \Big|_{z=z_1}, r_1 \leq r \leq r_0;$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z; \tau)}{\partial z} \Big|_{z=L_0} =$$

$$= \alpha_5 (T(r, z; \tau) - T_{\text{ж}}) \Big|_{z=L_0}, 0 \leq r \leq r_1,$$

где $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; ρ – плотность; r_0 – радиус диска; r_1 – радиус вала; z_1 – толщина диска; L_0 – длина двуступенчатого цилиндра; T^0 – начальная температура диска и вала; τ – время; τ_k – продолжительность охлаждения; α_6 – коэффициент теплоотдачи от жидкого шлака к диску; $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – коэффициенты теплоотдачи от поверхностей $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ к газу.

Если пренебречь теплообменом излучением, то коэффициенты теплоотдачи конвекцией $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ на границах $\Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_5$, и Γ_1 , определяются по формуле для вращающегося диска [14]:

$$\text{Nu} = 0,62 \text{Re}^{0,9} \text{Pr}^{0,33},$$

где $\text{Nu} = \frac{\alpha r_0}{\lambda}$; $\text{Re} = \frac{\omega r_0^2}{\nu}$; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$; α – средний по поверхности диска коэффициент теплоотдачи; r_0 – радиус диска; ω – угловая скорость вращения диска; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости; a^2 – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией в зазоре между вращающимися цилиндрами на границах Γ_2 и Γ_3 с наличием вынужденного осевого течения в диапазоне $Ta_m = 6 \cdot 10^7 \dots 12 \cdot 10^{12}$ и осевых чисел Рейнольдса $\text{Re}_z = 1,7 \cdot 10^5 \dots 13,7 \cdot 10^5$ определяются по формуле [15]:

$$\text{Nu}^* = 0,023 \text{Re}_z^{0,8} \text{Pr}^{0,5},$$

где, Re_z характеризующее вынужденное осевое течение, определяется следующим образом: $\text{Re}_z = V_{z0} \cdot 2h/\nu$, Ta_m – модифицированное число Тейлора. Здесь V_{z0} – среднерасходная скорость во входном сечении; $\text{Nu}^* = \alpha_3 \cdot 2h/\lambda$; h – ширина кольцевого зазора;

$$Ta_m = \frac{2\omega^2 R_1^2 h^3}{\nu^2 (R_1 + R_2)} \left(\frac{1697}{\pi^4} \cdot C \right)$$

– число Тейлора;

$$C = 0,0571 \left(1 - 0,652 \cdot \frac{h}{R_1} \right) + 0,00056 \left(1 - 0,652 \cdot \frac{h}{R_1} \right)^{-1}.$$

Расчет температурных полей в двухступенчатом цилиндре. Решение уравнения (1) с граничными условиями осуществляется методом дробных шагов по неявной устойчивой локально-одномерной схеме. На первом этапе расчетная область заменяется набором теплоизолированных между собой горизонтальных стержней, для каждого из которых методом баланса записывается соответствующая неявная конечно-разностная схема (2), учитывающая граничные условия на вертикальных границах $r = 0$, $r = r_1$ и $r = r_0$ как граничные условия для торцов стержня. При составлении уравнения баланса для нижнего и верхнего горизонтальных стержней их боковой теплообмен со средой учитывать не надо. На втором этапе аналогичным путем составляются конечно-разностные уравнения для вертикальных стержней (3):

$$\frac{T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} a \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(i-1)\Delta r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta r} \right); (2)$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} a \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right). (3)$$

Здесь $\Delta \tau$ – шаг по времени; Δr – приращение координаты по радиусу r ; Δz – приращение координаты по оси Oz ; $i = 1, \dots, n$ – точки лежат на оси Or ; $j = 1, \dots, m$ – точки лежат на оси Oz ; $T^k, T^{k+\frac{1}{2}}, T^{k+1}$ – значения температуры в моменты времени $\tau, \tau + \frac{1}{2}\Delta \tau, \tau + \Delta \tau$ соответственно.

Алгоритм расчета температурного поля в двухступенчатом цилиндре. Блок-схема алгоритма расчета температурного поля

в двухступенчатом цилиндре представлена на рис. 3:

В первом блоке задаются исходные данные: $r_0, r_1, L_0, z_1, \lambda, c, \rho, \lambda_r, \nu_r, \alpha_r, \rho_r, \lambda_{ж}, c_{ж}, \rho_{ж}, T^0, T_r, T_{ж}, \omega, N, M, \Delta \tau, d, \sigma, c_1, \tau_k$.

Во втором блоке проводится расчет угловой скорости $\omega = \frac{c}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{R\rho_{ж}}}$.

В третьем блоке проводится расчет приращений по радиусу $\Delta r = \frac{r_0}{N-1}$ и по длине $\Delta z = \frac{L_0}{M-1}$ и присвоение начальных значений температуры по сечению двухступенчатого цилиндра (в узлах сетки).

В четвертом блоке вычисляются $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – коэффициенты теплоотдачи от жидкого доменного шлака и от поверхности цилиндра к газу.

В пятом блоке рассчитываются коэффициенты неявного разностного уравнения для внутренних точек сетки при расчете температур в узлах сетки по радиусу: $A_r = 0,5 \cdot a \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta r^2}$,

$$A(i, j) = A_r \cdot \frac{i}{i-1}, B(i, j) = 1 + A_r \cdot \frac{2i-1}{i-1},$$

$$C(i, j) = A_r, D(i, j) = T_{ij}^k.$$

В шестом блоке проводится расчет коэффициентов разностного уравнения для граничных узлов сетки по радиусу: $A(i, j), B(i, j), C(i, j), D(i, j)$.

В седьмом блоке проводится расчет коэффициентов:

$$E(i, j) = \frac{A(i, j)}{B(i, j) - C(i, j) \cdot E(i-1, j)}$$

$$\text{и } F(i, j) = \frac{D(i, j) + C(i, j) \cdot F(i-1, j)}{B(i, j) - C(i, j) \cdot E(i-1, j)}$$

по радиусу для узлов $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$.

В восьмом блоке проводится расчет неизвестных температур за время $\frac{\Delta \tau}{2}$ по радиусу:

$$T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = E(i, j) \cdot T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} + F(i, j),$$

начиная с $i = n$ и заканчивая $i = 1$.

В девятом блоке проводится расчет коэффициентов неявного разностного урав-

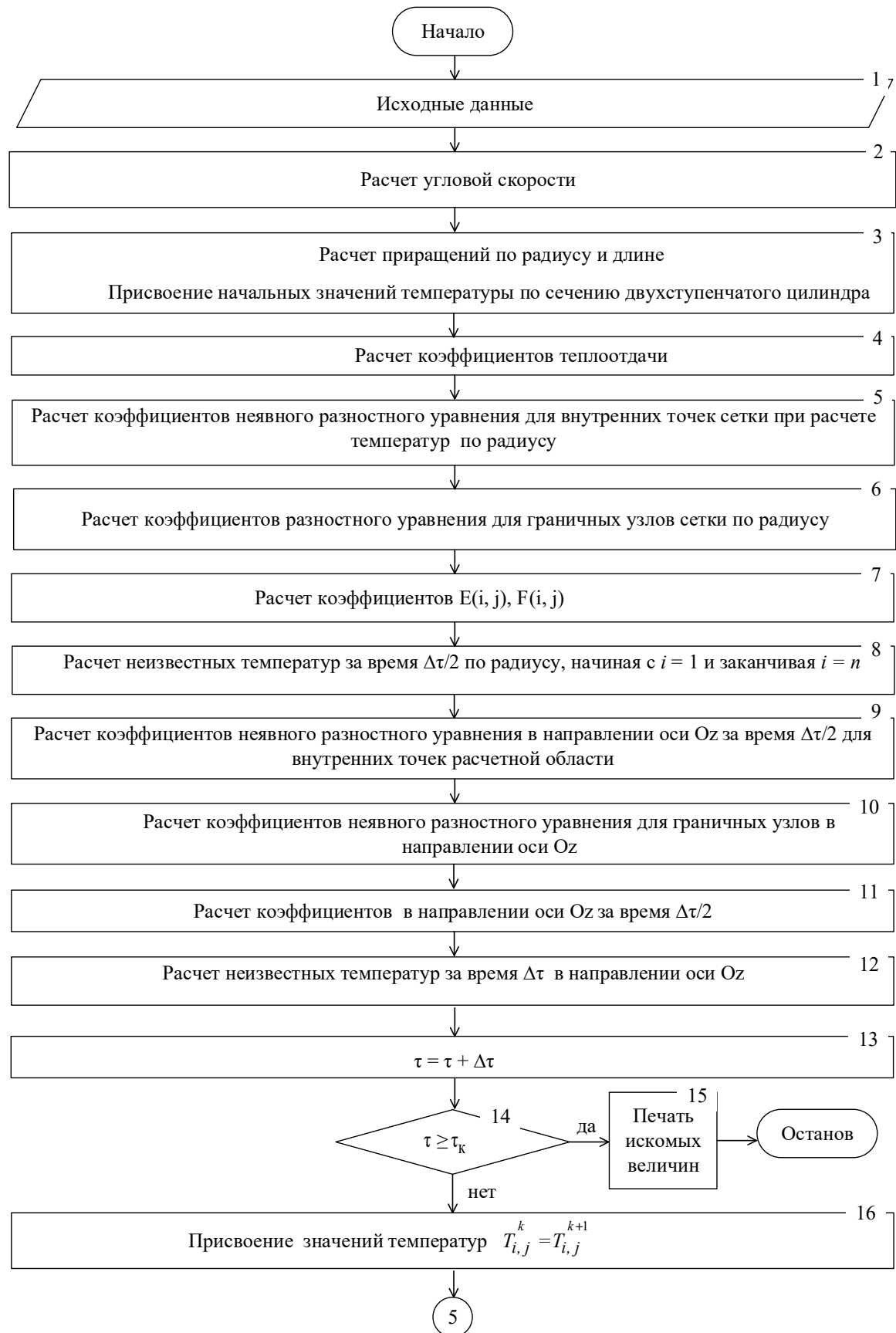


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета температурного поля в двухступенчатом цилиндре
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

нения в направлении оси Oz за время $\frac{\Delta\tau}{2}$:
 $A_z = 0,5 \cdot a \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta z^2}$, $A(i, j) = A_z$, $B(i, j) = 1 + 2 \cdot A_z$, $C(i, j) = A_z$, $D(i, j) = T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}$ для внутренних точек расчетной области.

В десятом блоке проводится расчет коэффициентов неявного разностного уравнения для граничных узлов в направлении оси Oz .

В одиннадцатом блоке рассчитываются коэффициенты:

$$E(i, j) = \frac{A(i, j)}{B(i, j) - C(i, j) \cdot E(i, j-1)}$$

$$\text{и } F(i, j) = \frac{D(i, j) + C(i, j) \cdot F(i, j-1)}{B(i, j) - C(i, j) \cdot E(i, j-1)}$$

в направлении оси Oz для узлов, начиная с $j = 1, \dots, m$ за время $\frac{\Delta\tau}{2}$.

В двенадцатом блоке проводится расчет неизвестных температур $T_{i,j}^{k+1} = E(i, j) \cdot T_{i,j+1}^{k+1} + F(i, j)$ за время $\Delta\tau$ в направлении оси Oz , начиная с $j = m$ и заканчивая $j = 1$.

В тринадцатом блоке производится переход на следующий временной уровень $\tau = \tau + \Delta\tau$.

В четырнадцатом блоке выполняется сравнение расчетного времени с заданным значением τ_k .

Если $\tau < \tau_k$, то в шестнадцатом блоке проводится присвоение полученных значений температур начальным: $T_{i,j}^k = T_{i,j}^{k+1}$ и осуществляется переход к пятому шагу данного алгоритма. Продолжаем расчет до момента времени $\tau \geq \tau_k$. Если $\tau \geq \tau_k$, то в пятнадцатом блоке вычисления останавливаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета температурных полей во вращающемся двухступенчатом цилиндре при прогреве его жидким доменным шлаком и одновременном охлаждении воздухом боковых поверхностей представлены на рис. 4. На рис. 4а представлено распределение температуры в двухступенчатом цилиндре, выполненном из стали 20 (коэффициент теплопроводности равен 51,1 Вт/(м·К)) через 10 с прогрева (линия 6) при охлаждении боковых поверхностей холодным воздухом. Ко-

эффициент теплоотдачи от боковой поверхности цилиндра к воздуху равен 65 Вт/(м² · К). Температура резко изменяется в начальный момент прогрева диска и охлаждения вала. С увеличением продолжительности прогрева до 180 °С начинает прогреваться вал, при этом температура поверхности диска также увеличивается (линия 5). Дальнейшее прогревание поверхности диска и охлаждение боковых поверхностей двухступенчатого цилиндра приводит к росту температур поверхности диска и вала (линии 5, 4, 3, 2). При прогреве в течение 3 600 с устанавливается максимальная температура поверхности диска, а также увеличивается температура вала (линия 1). На рис. 4б представлено изменение температуры в центре диска двухступенчатого цилиндра и по оси Oz , выполненного из стали X18 (коэффициент теплопроводности равен 23,3 Вт/(м·К)). Распределение температуры в двухступенчатом цилиндре изменяется резко по толщине диска и по длине вала. Температурное поле через 10 с прогрева торца цилиндра и охлаждения вала холодным воздухом представлено линией 6. Увеличение продолжительности прогрева торца двухступенчатого цилиндра и охлаждение боковых поверхностей приводит к существенному увеличению температуры поверхности диска по сравнению с увеличением температуры по центру вала (линии 5, 4, 3, 2). Максимальная температура в центре поверхности диска достигается через 3 600 с и практически сравнивается с температурой греющей среды и жидким доменным шлаком.

Из рис. 4 видно, что материал изделия влияет на температурное поле по оси Oz , вал, на котором расположен вращающийся диск, прогревается больше с увеличением коэффициента теплопроводности материала. Торцевая поверхность диска имеет большую температуру при охлаждении воздухом боковой поверхности.

На рис. 5 представлены результаты расчета температурного поля во вращающемся двухступенчатом цилиндре при прогреве его жидким доменным шлаком и одновременном охлаждении вала водой. Коэффициент теплоотдачи от боковой поверхности цилиндра к воде равен 3 490 Вт/(м² К). На рис. 5а представлено

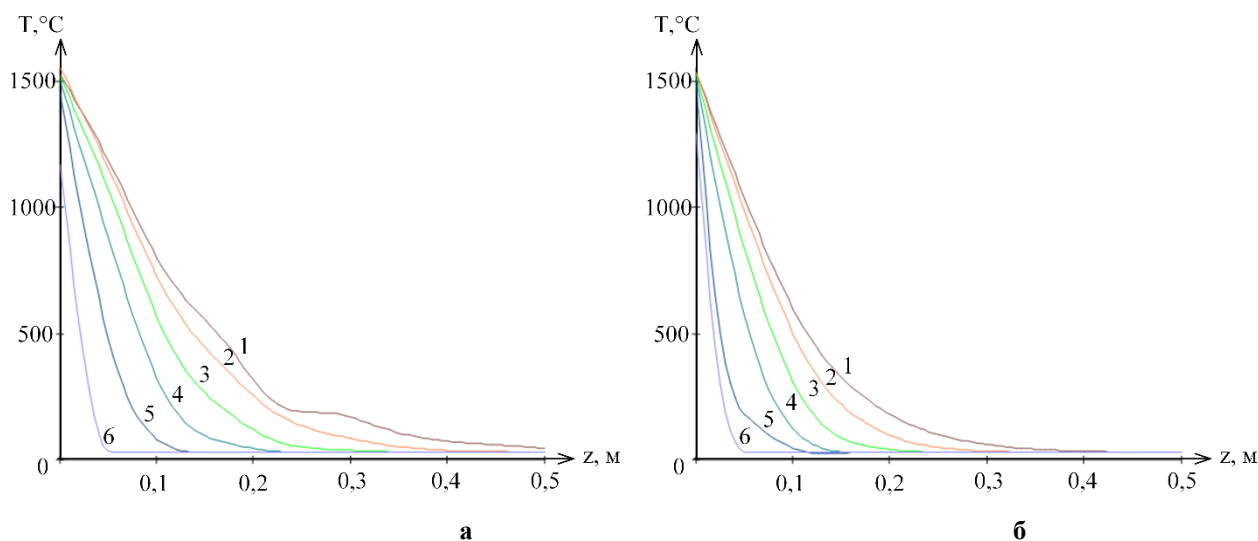


Рис. 4. Распределение температуры по оси Oz во времени при нагреве диска жидким доменным шлаком и охлаждении вала воздухом:

а) материал – сталь 20; б) материал – X18

1 – $\tau = 3600$ с; 2 – $\tau = 1800$ с; 3 – $\tau = 900$ с; 4 – $\tau = 450$ с; 5 – $\tau = 180$ с; 6 – $\tau = 10$ с

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

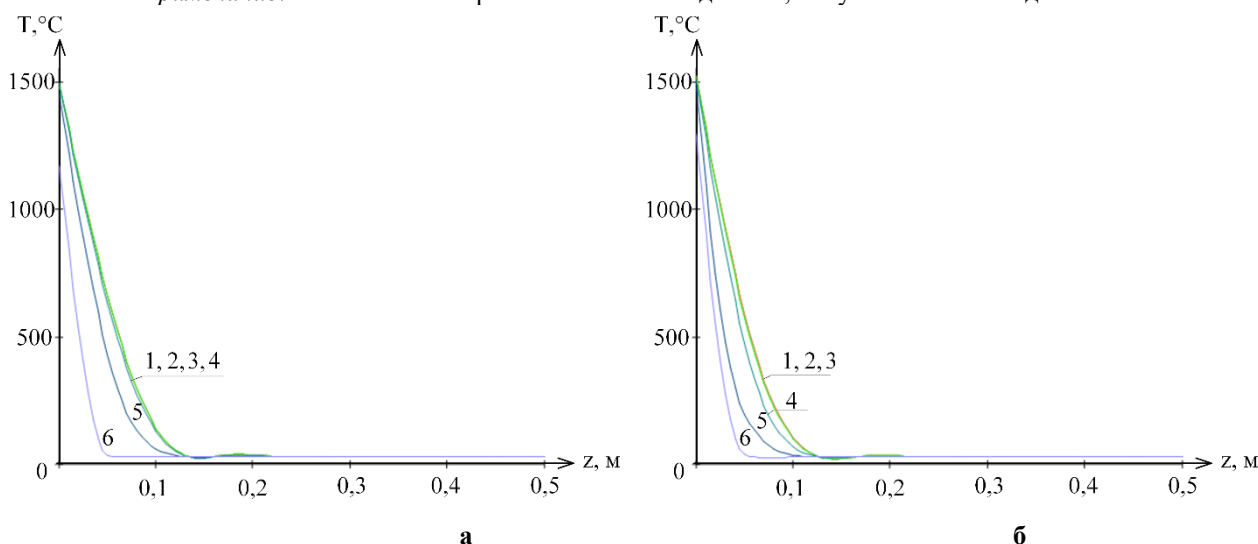


Рис. 5. Распределение температуры по оси Oz во времени при нагреве диска жидким доменным шлаком и охлаждении вала водой:

а) материал – сталь 20; б) материал – X18

1 – $\tau = 3600$ с; 2 – $\tau = 1800$ с; 3 – $\tau = 900$ с; 4 – $\tau = 450$ с; 5 – $\tau = 180$ с; 6 – $\tau = 10$ с

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

распределение температуры при прогреве торца двухступенчатого цилиндра жидким доменным шлаком и охлаждении боковой поверхности холодной водой. Материал изделия – сталь 20 (коэффициент теплопроводности равен $51,1 \text{ Вт/(м·К)}$). Температура по толщине диска резко изменяется. Линия 6 отображает температурное поле по оси вращения через 10 с прогрева торца двухступенчатого цилиндра и охлаждения водой боковой поверхности.

Дальнейший прогрев (линии 5, 4, 3, 2, 1) показывает, что температура поверхности диска растет, а температура вала практически не изменяется. При этом охлаждаемая часть двухступенчатого цилиндра имеет низкую температуру, а поверхность прогреваемого диска имеет очень высокую температуру. На рис. 5б представлены температурные поля при прогреве торца двухступенчатого цилиндра жидким доменным шлаком и охлаждении его боковых

поверхностей холодной водой через 10, 180, 450, 900, 1800 и 3600 с. Материал изделия – сталь X18 (коэффициент теплопроводности 23,3 Вт/(м·К)). Из рис. 5 видно, что температура поверхности диска растет почти до температуры жидкого доменного шлака, а температура вала практически не изменяется (линии 6, 5, 4, 3, 2, 1). Из рис. 4 и 5 видно, что температура обогреваемой поверхности распыливающего диска выше температур зоны фазового перехода доменного шлака и учет фазового перехода в модели не осуществляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана математическая модель теплообмена двухступенчатого вращающегося цилиндра при интенсивном обогреве торца цилиндра и охлаждении боковых поверхностей. Осуществлено численное решение двухмерного по координате нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат при граничных условиях третьего рода. Решение уравнения с граничными условиями третьего рода осуществлено методом дробных шагов по неявной устойчивой локально-одномерной схеме. Математи-

ческая модель позволяет прогнозировать температурные поля при изменении значений граничных условий третьего рода. Разработан алгоритм расчета температурного поля в двухступенчатом цилиндре при граничных условиях третьего рода. Полученные в результате расчета температурные поля в двухступенчатом цилиндре показывают, что при интенсивном обогреве торцевой поверхности двухступенчатого цилиндра и охлаждении боковых поверхностей невозможно охладить торцевую поверхность до приемлемых температур по условиям работоспособности. Поэтому для прогнозирования температурного поля в двухступенчатом цилиндре с интенсивным обогревом торцевой поверхности необходимо разработать математическую модель теплообмена двухступенчатого цилиндра с теплоизолирующей прослойкой на торцевой поверхности. Результаты моделирования можно применять для оптимизации технологических параметров процесса охлаждения при проектировании распыливающего диска установки сухой грануляции жидкого доменного шлака, использование которой приводит к уменьшению загрязнения окружающей среды.

Список источников

1. Zhang H., Wang H., Zhu X. et al. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry // *Applied Energy*. 2013. Vol. 112. P. 956–966.
2. Pickering S. J., Hay N., Roylance T. F. et al. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag // *Ironmaking and Steelmaking*. 1985. Vol. 12, no. 1. P. 14–20.
3. Каппес Х., Мичелс Д. Сухая грануляция шлака с утилизацией энергии – от рождения идеи до пилотной установки // *Черные металлы*. 2015. № 5 (1001). С. 46–52.
4. Yu P., Wang S., Li Y. et al. A review of granulation process for blast furnace slag // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 68.
5. Xie D., Jahanshahi S., Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment // *Proceedings of the Conference “Sustainable Mining 2010”*, August 17–19, 2010, Kalgoorlie, Australia. Carlton, Vic.: AusIMMP, 2010. P. 22–28.
6. Barati M., Esfahani S., Utigard T. A. Energy recovery from high temperature slag // *Energy*. 2011. Vol. 36, no. 9. P. 5440–5449.

References

1. Zhang H., Wang H., Zhu X. et al. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. *Applied Energy*. 2013;112:956–966.
2. Pickering S. J., Hay N., Roylance T. F. et al. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 1985;12(1):14–20.
3. Kappes H., Michels D. Dry slag granulation with energy recovery – from inception to pilot plant. *Chernye metally*. 2015;(5):46–52. (In Russ.).
4. Yu P., Wang S., Li Y. et al. A review of granulation process for blast furnace slag. *MATEC Web of Conferences*. 2016;68.
5. Xie D., Jahanshahi S., Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment. In: *Proceedings of the Conference “Sustainable Mining 2010”*, August 17–19, 2010, Kalgoorlie, Australia. Carlton, Vic.: AusIMMP; 2010. p. 22–28.
6. Barati M., Esfahani S., Utigard T. A. Energy recovery from high temperature slag. *Energy*. 2011;36(9):5440–5449.
7. Galley A. I., Naumkin V. V., Sukinova N. V. et al. Skhemy pererabotki metallurgicheskikh shlakov. *Stal*. 2007;(2):144. (In Russ.).

7. Галлей А. И., Наумкин В. В., Сукинова Н. В. и др. Схемы переработки металлургических шлаков // *Сталь*. 2007. № 2. С. 144.
8. Филатов С. В., Лозович А. В., Титов В. Н. и др. Анализ работы доменных печей при высокой интенсивности плавки // *Металлург*. 2017. № 10. С. 18–21.
9. Филатов С. В., Курунов И. Ф., Титов В. Н. и др. Внедрение энергоэффективных решений при выплавке чугуна в ПАО «НЛМК» // *Металлург*. 2019. № 4. С. 25–28.
10. Онорин О. П., Полинов А. А., Павлов А. В. и др. О возможности использования теплового баланса доменной плавки для контроля тепловых потерь // *Металлург*. 2018. № 3. С. 30–34.
11. Урбанович Г. И., Урбанович Е. Г., Панов В. А. и др. Потери тепла с жидкими доменными шлаками и технические решения по их сокращению // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2008. № 7 (1303). С. 51–56.
12. Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Донцова Ю. В. Математическая модель прогнозирования теплообмена одиночной капли доменного шлака при неустановившемся движении во встречном потоке газа // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2022. Т. 18, № 3. С. 30–38.
13. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
14. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М.: Физматгиз, 1960. 260 с.
15. Мочалин Е. В., Юрьев С. А. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами // *Технологический аудит и резервы производства*. 2013. Т. 3, № 1 (11). С. 45–49.
8. Filatov S. V., Lozovich A. V., Titov V. N. et al. Analysis of BF process at high intensivity smelting operation. *Metallurg*. 2017;(10):18–21. (In Russ.).
9. Filatov S. V., Kurunov I. F., Titov V. N. et al. Introduction of energy efficiency measures at ironmaking in JSC “NLMK”. *Metallurg*. 2019;(4):25–28. (In Russ.).
10. Onorin O. P., Polinov A. A., Pavlov A. V. et al. About possibility of using BF heat balance to control heat losses. *Metallurg*. 2018;(3):30–34. (In Russ.).
11. Urbanovich G. I., Urbanovich E. G., Panov V. A. et al. Poteri tepla s zhidkimi domennymi shlakami i tekhnicheskie resheniya po ikh sokrashcheniyu. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2008;(7):51–56. (In Russ.).
12. Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Dontsova Yu. V. Mathematical model for predicting heat exchange of a single blast of furnace slag droplet in unsteady motion in a counter gas flow. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022;18(3):30–38. (In Russ.).
13. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti. Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 599 p. (In Russ.).
14. Dorfman L. A. Gidrodinamicheskoe soprotivlenie i teplootdacha vrashchayushchikhsya tel. Moscow: Fizmatgiz; 1960. 260 p. (In Russ.).
15. Mochalin Ye. V., Yuriev S. A. Heat transfer and hydraulic losses in the gap between rotating cylinders. *Technology audit and production reserves*. 2013;3(1):45–49. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. Н. Синицын – доктор технических наук, профессор;

<https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>,
nnsinitcyn@chsu.ru

Ю. В. Грибкова – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>,
150475@mail.ru✉

И. А. Сарычева – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>,
sariranat@gmail.com

Н. В. Запатрина – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0009-0001-5558-5291>,
z_natalia777@mail.ru

Е. В. Голицына – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>,
e_golitsyna@mail.ru

О. С. Разинкова – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0000-8733-1379>,
osmalakhova@chsu.ru

About the authors

N. N. Sinitsyn – Doctor of Sciences (Engineering), Professor;

<https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>,
nnsinitcyn@chsu.ru

Yu. V. Gribkova – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>,
150475@mail.ru✉

I. A. Sarycheva – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>,
sariranat@gmail.com

N. V. Zapatrina – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0009-0001-5558-5291>,
z_natalia777@mail.ru

E. V. Golitsyna – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>,
e_golitsyna@mail.ru

O. S. Razinkova – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0000-8733-1379>,
osmalakhova@chsu.ru

Научная статья

УДК 004.5

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-9>



Разработка модуля человеко-машинного интерфейса с функцией выявления утомления человека

Михаил Яковлевич Брагинский, Дмитрий Викторович Тараканов✉

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрена задача распознавания состояния утомления человека в процессе его трудовой деятельности. Разработано программное обеспечение для выявления утомления человека и голосового оповещения с помощью библиотеки pytsx3. Проведенная апробация программного обеспечения показала возможность его применения для идентификации утомления человека.

Ключевые слова: состояние утомления, распознавание эмоций, человеко-машинное взаимодействие, человек-оператор

Для цитирования: Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Разработка модуля человеко-машинного интерфейса с функцией выявления утомления человека // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 93–100. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-9>.

Original article

Developing module of human-machine interface for fatigue identification in people

Mikhail Ya. Braginskii, Dmitry V. Tarakanov✉

Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The work addresses the problem of identifying a human fatigue state experienced during work activities. The authors develop software for exhaustion recognition and subsequent voice notification using pytsx3 library. Conducted testing of the designed unit reveals the possibility of its implementation in people's fatigue detection.

Keywords: fatigue state, emotion recognition, human-machine interface, human operator

For citation: Braginskii M. Ya., Tarakanov D. V. Developing module of human-machine interface for fatigue identification in people. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):93–100. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-9>.

ВВЕДЕНИЕ

Усталость человека и снижение его внимания при управлении техническими системами являются одной из ключевых причин аварий и сбоев в промышленности, транспорте и других сферах, где от концентрации оператора напрямую зависит безопасность производства. В условиях интенсивной нагрузки, продолжительных смен, монотонной деятельности или работы в ночное время даже кратковременная потеря концентрации способна привести к катастрофическим последстви-

ям. Множество катастроф техногенного характера происходили в ночное время, когда сотрудники особенно подвержены усталости [1]. По оценкам Национального управления безопасностью движения на трассах США, до 100 тысяч дорожно-транспортных происшествий ежегодно происходят по причине сонного вождения [2]. Также, по данным Министрства транспорта Новой Зеландии [3], в 2022 году произошло 34 смертельных случая, 80 – с серьезными травмами и 460 – с легкими травмами, где усталость водителя была

способствующим фактором [4]. Аналогичная ситуация наблюдается в промышленности.

Современное развитие технологий искусственного интеллекта, компьютерного зрения и обработки видеопотока создает условия для разработки интеллектуальных систем, способных в реальном времени отслеживать признаки утомления человека без использования инвазивных методов [5]. Такие системы анализируют мимику, жесты, положение головы, частоту морганий и другие визуальные признаки, позволяя оперативно определять моменты, когда внимание оператора снижается, и предпринимать превентивные меры. Основное преимущество визуальных систем в том, что они не требуют ношения датчиков, не вызывают дискомфорта, легко интегрируются в рабочую среду и доступны по стоимости, так как могут работать с обычной веб-камерой.

В то же время создание устойчивой и точной системы распознавания усталости сопряжено с рядом технических вызовов. На практике необходимо обеспечить корректную работу при нестабильном освещении, различных ракурсах лица, наличии очков или бороды, быстрой смене мимики. Требуется учитывать индивидуальные особенности пользователей. Кроме того, одни признаки усталости, такие как частые зевки или наклоны головы, могут наблюдаться и без фактической утомленности, что создает риск ложных срабатываний. Поэтому система должна быть не только чувствительной, но и интерпретируемой, способной комбинировать признаки и принимать решения на основе комплексного анализа.

В рамках данной работы реализована интеллектуальная система мониторинга признаков усталости, основанная на анализе видеопотока в реальном времени. В качестве основных инструментов используются библиотека MediaPipe для извлечения ключевых точек лица, алгоритмы для расчета метрик открытости глаз, раскрытия рта, процента закрытых глаз, а также алгоритм оценки положения головы. Дополнительно в систему интегрирована предварительно обученная сверточная нейронная сеть, позволяющая рас-

познавать эмоциональные состояния пользователя, ассоциированные с утомлением [6]. Все вычисляемые параметры визуализируются на экране и сопровождаются голосовыми оповещениями при фиксации усталости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппаратная часть установки включала персональный компьютер с операционной системой Windows 10 и веб-камерой.

Для разработки программной архитектуры системы интеллектуального распознавания усталости человека требовалась структурная декомпозиция всех компонентов. Программное обеспечение создавалось в рамках парадигмы модульности, чтобы каждая функциональная единица могла быть масштабируема, проверяема и логически отделима от остальных. Такая архитектура обеспечивает как удобство в сопровождении и отладке, так и возможность дальнейшего расширения системы – например, путем добавления новых биометрических метрик или интеграции с внешними устройствами мониторинга состояния водителя.

В итоге был разработан алгоритм функционирования системы, построенный в виде циклического процесса, состоящего из нескольких этапов обработки видеопотока и принятия решений. На старте выполняется инициализация необходимых ресурсов, а далее система непрерывно обрабатывает поступающие кадры в реальном времени.

1. Начало работы – Система запускается, инициализируя основной цикл обработки данных.

2. Загрузка конфигурации и моделей – На этом этапе загружаются параметры конфигурационного файла (например, пороговые значения метрик усталости), а также предварительно обученные модели, включая модель распознавания эмоций и параметры MediaPipe.

3. Захват кадра с камеры – Осуществляется подключение к видеопотоку и поочередный захват каждого кадра в режиме реального времени при помощи библиотеки OpenCV [7].

4. Предварительная обработка кадра – Включает операции улучшения изображения, такие как выравнивание гистограммы

(CLANE), коррекция контраста и преобразование цветового пространства [8]. Это необходимо для повышения устойчивости работы моделей и точности распознавания.

5. Обнаружение лица – На обработанном кадре выполняется поиск и локализация лица с использованием алгоритма MediaPipe. Если лицо не обнаружено, система возвращается к захвату следующего кадра, повторяя цикл.

6. Проверка наличия лица – В случае успешного обнаружения лица, система переходит к следующему этапу, в противном случае продолжает попытки с последующими кадрами.

7. Расчет метрик – Извлекаются лицевые признаки и рассчитываются количественные метрики, включая:

- EAR (Eye Aspect Ratio) – степень открытия глаз;
- MAR (Mouth Aspect Ratio) – степень открытия рта;
- PERCLOS – доля времени с закрытыми глазами [9];
- положение головы (pitch, yaw, roll);
- эмоциональное состояние на основе распознанной эмоции.

8. Вывод метрик на экран – Значения всех метрик визуализируются на изображении

и отображаются пользователю вместе с контуром лица и маркерами (рис. 1). Это позволяет проводить мониторинг состояния в реальном времени.

9. Проверка состояния усталости – Производится сопоставление текущих значений метрик с порогами, заданными в конфигурации. При выполнении хотя бы одного из критериев (например, длительное закрытие глаз, зевок, наклон головы, выражение негативной эмоции) система определяет наличие признаков усталости.

10. Звуковое оповещение и визуализация тревоги – При подтверждении усталости срабатывает речевое предупреждение и выводится визуальное сообщение «Усталость обнаружена!» на экране. Также регистрируется событие в лог-файле с указанием причины.

11. Проверка завершения работы – Если пользователь нажал клавишу ESC, система завершает работу. В противном случае цикл продолжается с захвата следующего кадра.

12. Завершение работы – После выхода из цикла завершается обработка, освобождаются ресурсы видеопотока и закрываются окна визуализации.



Рис. 1. Вывод значений метрик

Примечание: составлено авторами.

Одним из ключевых элементов интерфейса системы является голосовое оповещение пользователя о наступлении усталости или риске засыпания. Для этого в системе реализована технология преобразования текста в речь Text-to-Speech (TTS), работающая в реальном времени и не влияющая на производительность потока обработки видео [10].

Для реализации речевого сопровождения в проекте использована библиотека pyttsx3 –

это кросс-платформенный синтезатор речи, не требующий подключения к интернету и обеспечивающий стабильную работу как в Windows-, так и в Linux-среде. Среди его преимуществ:

- поддержка множества языков и голосов (включая русский);
- возможность настройки скорости и громкости речи;
- полная автономность от облачных сервисов.

В настройках по умолчанию используется мужской русский голос с умеренной скоростью речи. Для каждой ситуации предусмотрен отдельный текст, озвучиваемый при возникновении события.

Воспроизведение сообщений способно поддержать основной поток при использовании синхронных вызовов. Поэтому реализация TTS была перенесена в отдельный поток с помощью модуля `threading`. Это позволяет:

- запускать голосовое уведомление асинхронно, не останавливая захват и анализ видео;
- управлять очередью сообщений;
- исключить наложение или заикание при многократных вызовах.

Данный механизм был реализован следующим образом:

- при возникновении события строка с текстом добавляется в очередь озвучивания;
- поток TTS просматривает очередь и при наличии новых сообщений озвучивает их.

Для предотвращения повторов сообщений был введен флаг блокировки на 10 секунд после каждого произнесенного предупреждения.

Голосовая генерация реализована с помощью библиотеки `pyttsx3`, которая обеспечивает офлайн-синтез речи. При инициализации модуля задаются основные параметры:

```
engine = pyttsx3.init()

engine.setProperty('rate', 150)

engine.setProperty('voice',
engine.getProperty('voices')[0].id)
```

Здесь `rate` – скорость произношения, установленная в 150 слов в минуту, `voice` – используется системный голос по умолчанию.

Чтобы избежать блокировки основного видеопотока во время озвучивания, генерация речи вынесена в отдельный поток с использованием модуля `threading`. Это позволяет не прерывать захват и анализ кадров в процессе воспроизведения звукового сигнала:

```
def alert_driver():

    def speak():

        engine.say("Критическое
снижение работоспособности!")
```

```
engine.runAndWait()

threading.
Thread(target=speak, daemon=True).
start()
```

Вызов данной функции `alert_driver()` инициирует запуск нового потока, в котором происходит голосовой синтез и воспроизведение предупреждения. При использовании параметра `daemon=True` поток завершается автоматически при остановке основного процесса.

Оповещение оператора происходит при одновременном выполнении условий: если системой было выявлено состояние усталости (`fatigue == True`) и с момента предыдущего голосового сигнала прошло достаточное время.

Это реализовано следующим образом:

```
if fatigue and (time.time() -
last_alarm_time) > ALERT_COOLDOWN:

...

alert_driver()

last_alarm_time = time.time()
```

Тем самым было исключено повторное срабатывание сигнала в течение короткого промежутка времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки эффективности разработанной интеллектуальной системы распознавания усталости человека было проведено комплексное тестирование, направленное на верификацию работы каждого функционального компонента, а также общей способности системы к устойчивому и точному выявлению признаков усталости в приближенных к реальным условиям эксплуатации.

При организации тестирования было уделено внимание внешним факторам, влияющим на качество видеопотока и последующее извлечение признаков:

- 1) изменения освещенности:
 - дневной свет (естественное освещение);
 - контровой свет;
 - тусклое освещение;
- 2) различные положения лица:
 - фронтальное;
 - частичный профиль;

3) условия съемки:

– использование встроенной веб-камеры (30 FPS, 720p);

– расстояние от камеры – от 30 до 70 см;

– движение головы во время съемки;

Для всех участников продолжительность тестирования составляла 1–2 минуты. Во время работы системы участник занимался работой в текстовом редакторе, используя 2 монитора, что позволяло убедиться в устойчивости системы к ложным срабатываниям на поворот головы и зрачков.

Перед тестированием пользователь был подвержен усталости выше среднего вследствие

продолжительной работы за компьютером (~7 часов).

Ниже представлены составленные графики метрик, полученные в ходе сбора данных.

В первую очередь были рассмотрены результаты изменения метрики открытия глаз. При условиях данного сценария значение EAR участника 1 для открытого состояния глаз равно 0,3–0,35. Состояние закрытых глаз на графике определяется по продолжительному сохранению значения 0. По данным графика на рис. 2 видно, что длительные закрытия глаз отсутствуют.

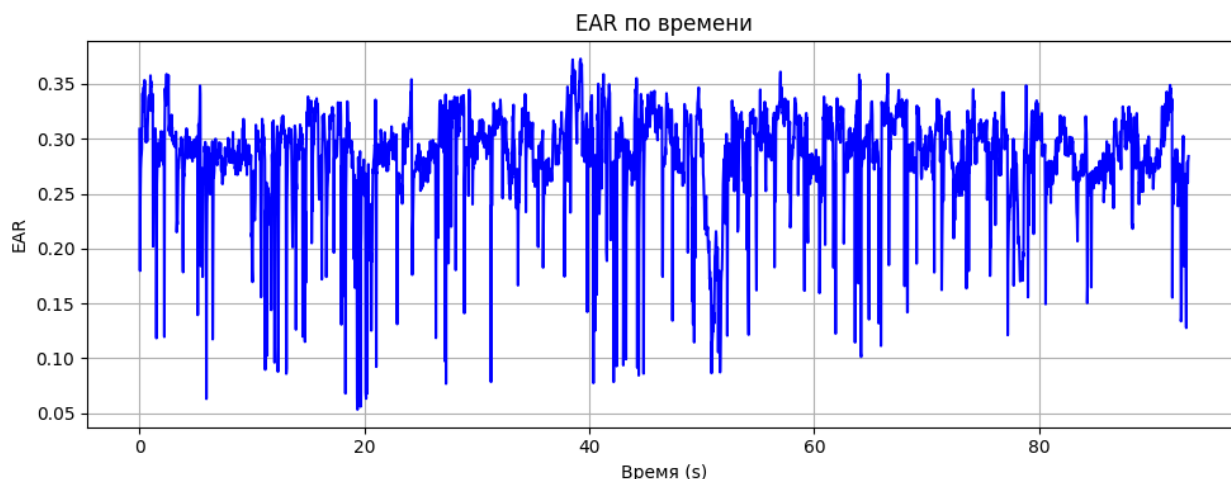


Рис. 2. График EAR для участника 1

Примечание: составлено авторами.

Далее был исследован график эмоций по времени, представленный на рис. 3. Основываясь на этих данных, можно сделать вывод, что большую часть времени были распознавались состояния «neutral» и «sad», а к концу сценария – значение «happy».

В итоге система по совокупности метрик формировала сигнал тревоги и, как видно по рис. 6, в сумме за сеанс было 10 срабатываний тревоги.

Данная интеллектуальная система распознавания усталости ориентирована на решение задачи мониторинга состояния человека-оператора в реальных условиях эксплуатации технических систем. Принципиально важным является тот факт, что система не требует вмешательства в физиологическую структуру

пользователя, не использует инвазивные или обременяющие датчики, что делает ее особенно привлекательной с точки зрения практического внедрения.

В основе системы лежит анализ визуальной информации с обыкновенной камеры. Это означает, что разработка может быть реализована на широкой номенклатуре устройств:

- настольные компьютеры и ноутбуки;
- промышленные и пользовательские планшеты;
- встраиваемые одноплатные компьютеры;
- автомобильные терминалы и моноблоки.

Для своевременного привлечения внимания пользователя при обнаружении признаков усталости в системе реализовано голосовое оповещение. Звуковое сопровождение

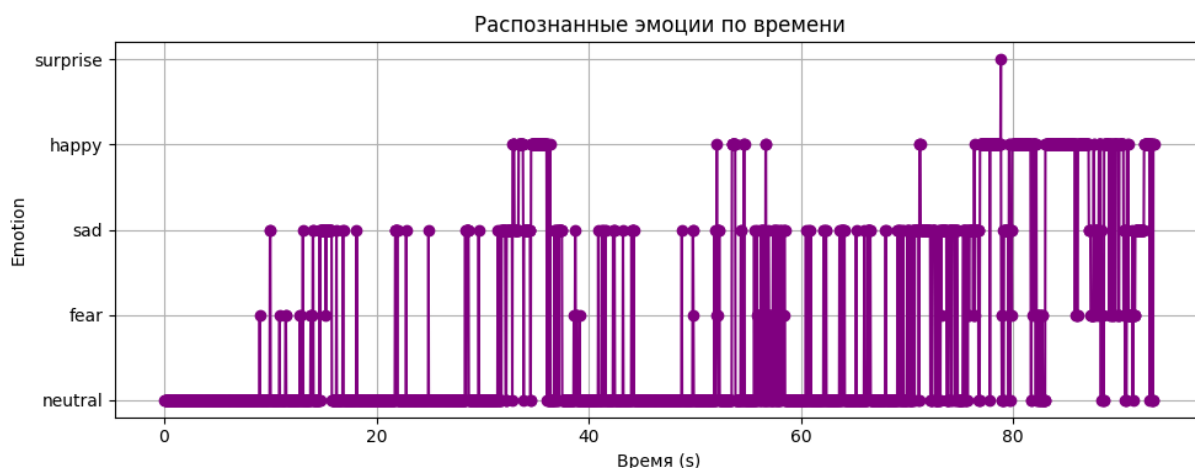


Рис. 3. График выявленных эмоций для участника 1
Примечание: составлено авторами.

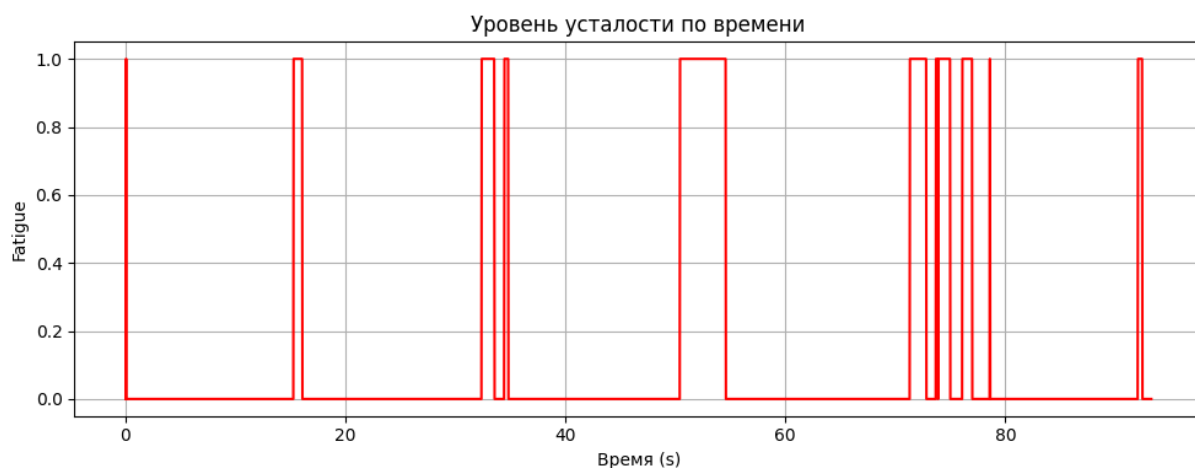


Рис. 4. График выявленных состояний усталости для участника 1
Примечание: составлено авторами.

дополняет визуальные сигналы тревоги, что актуально в случаях, когда оператор не смотрит на экран (например, при управлении транспортным средством).

В отличие от специализированных биометрических систем (ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ, ЭОГ), здесь не требуется обучение пользователя, установка электродов, настройка чувствительных каналов – достаточно, чтобы лицо оператора находилось в кадре.

Реализованная система может применяться в различных отраслях, где усталость человека может стать причиной ошибок, инцидентов или потери управления.

Помимо упомянутых сфер применения (транспорт, пульта управления технологическими процессами), данную систему возможно также применять при обучении и трени-

ровке операторов [11, 12]. В учебных центрах и симуляторах система может использоваться для оценки работоспособности обучающихся, прохождения ими стрессовых ситуаций или утомительных сценариев. Это может служить элементом учебной диагностики или быть частью тренажеров высокой сложности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы была разработана и апробирована программа выявления состояния утомления человека. Разработанный программный модуль может быть использован при мониторинге состояния операторов при управлении АСУ ТП и транспорта.

Научная новизна данной работы заключается в разработке и экспериментальной проверке комплексного алгоритма распознавания

признаков усталости на основе синтеза методов компьютерного зрения и нейросетевого анализа эмоционального состояния. В отличие от традиционных подходов, использующих ограниченный набор признаков (например, только закрытие глаз), в данной работе реализована многомодальная модель, учитывающая коэффициент открытости глаз, степень раскрытия рта и интегральный показатель PERCLOS.

Настоящее исследование основывается на сочетании современных технологий компьютерного зрения, алгоритмов машинного обучения и методов анализа человеческих эмоций. Оно ориентировано на достижение высокой точности при минимальных затратах и служит вкладом в развитие систем интеллектуального мониторинга состояния человека в реальном времени.

Список источников

1. Национальный медицинский исследовательский центр им. Алмазова. Синдром хронической усталости. URL: https://www.almazovcentre.ru/?page_id=12340 (дата обращения: 10.01.2026).
2. Drowsy Driving // National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). URL: <https://www.nhtsa.gov/risky-driving/drowsy-driving> (дата обращения: 10.01.2026).
3. Fatigue // Ministry of Transport, New Zealand. URL: <https://www.transport.govt.nz/statistics-and-insights/safety-annual-statistics/sheet/fatigue> (дата обращения: 10.01.2026).
4. Шиенкова А. С., Подгайный А. М. Состояние усталости за рулем как угроза безопасности дорожного движения // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 11. С. 261–263.
5. Аржанов Е. А. Оценка усталости водителя на основе нейросетевой модели с использованием библиотеки OpenCV // Молодая наука Сибири. 2024. Т. 1, № 23. URL: <https://ojs.irknps.ru/index.php/mns/article/view/1370> (дата обращения: 10.01.2026).
6. Катаев М. Ю., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. и др. Применение нейросетевого классификатора для оценки эмоционального состояния человека // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 1. С. 19–25.
7. Pose computation overview // OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/d1f/calib3d_solvePnP.html (дата обращения: 16.06.2025).
8. Адаптивное выравнивание гистограммы (CLAHE) // Документация Siril. URL: <https://siril.readthedocs.io/ru/latest/processing/clahe.html> (дата обращения: 16.06.2025).
9. Abe T. PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: Current evidence and future directions // Sleep Advances. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 1–13.
10. Речевые технологии. Часть 1. Text-to-Speech: как работает синтез речи // Voximplant. URL: https://voximplant.kz/blog/how_does_text_to_speech_work (дата обращения: 10.01.2026).
11. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Построение многофункционального тренажера по управлению теплоэнергетической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 2 (30). С. 161–168.

References

1. Natsionalnyy meditsinskiy issledovatel'skiy tsentr im. Almazova. Sindrom khronicheskoy ustalosti. URL: https://www.almazovcentre.ru/?page_id=12340 (accessed: 10.01.2026). (In Russ.).
2. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Drowsy Driving. URL: <https://www.nhtsa.gov/risky-driving/drowsy-driving> (accessed: 10.01.2026).
3. Ministry of Transport, New Zealand. Fatigue. URL: <https://www.transport.govt.nz/statistics-and-insights/safety-annual-statistics/sheet/fatigue> (accessed: 10.01.2026).
4. Shienkova A. S., Podgayny A. M. Fatigue at the wheel as a threat to road safety. *Humanities, Social-Economic and Social Sciences*. 2019;(11):261–263. (In Russ.).
5. Arzhanov E. A. Driver fatigue assessment based on a neural network model using the OpenCV library. *Young Science of Siberia*. 2024;1(23). URL: <https://ojs.irknps.ru/index.php/mns/article/view/1370> (accessed: 10.01.2026). (In Russ.).
6. Kataev M. Yu., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. et al. Implementation of neural classifier for assessing human emotional state. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(1):19–25. (In Russ.).
7. OpenCV. Pose computation overview. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/d1f/calib3d_solvePnP.html (accessed: 16.06.2025).
8. Contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE). Siril's documentation. URL: <https://siril.readthedocs.io/ru/latest/processing/clahe.html> (accessed: 16.06.2025). (In Russ.).
9. Abe T. PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: Current evidence and future directions. *Sleep Advances*. 2023;4(1):1–13.
10. Voximplant. Rechevye tekhnologii. Chast 1. Text-to-Speech: kak rabotaet sintez rechi. URL: https://voximplant.kz/blog/how_does_text_to_speech_work (accessed: 10.01.2026). (In Russ.).
11. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Construction of multifunctional simulator for controlling heat and power system. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(2):161–168. (In Russ.).

12. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование взаимодействия коллектива операторов в процессе управления технической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 4 (32). С. 100–106.

Информация об авторах

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>,

braginskiy_myasurgu.ru

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>,

sprtdv@mail.ru✉

12. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Simulation of human operators group interaction during the control of industrial system. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(4):100–106. (In Russ.).

About the authors

M. Ya. Braginskii – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>,

braginskiy_myasurgu.ru

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>,

sprtdv@mail.ru✉

Научная статья

УДК 519.852.64 + 004.056.55

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-10>



Обобщение кодов Уолша – Адамара

Михаил Сергеевич Беспалов¹, Кирилл Андреевич Фролов²✉

¹Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

²АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, Россия

Аннотация. Предлагается усовершенствование кодов Уолша – Адамара, дополненного кода Уолша и p -го варианта кода Уолша – Адамара, в виде матричного шифрования кодовой матрицей. Показано, что усовершенствование не влияет на процесс обнаружения и исправления ошибок. Разработаны алгоритмы декодирования по кодовой матрице как дополнение к декодированию по списку. Приведен пример, демонстрирующий, что в p -ном случае метод работает с ошибками разных типов: замещения, стирания и появления символа.

Ключевые слова: блочное кодирование, код Уолша – Адамара, дополненный код Уолша, код Рида – Маллера, линейная перестановка, конечное поле

Для цитирования: Беспалов М. С., Фролов К. А. Обобщение кодов Уолша – Адамара // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-10>.

Original article

Generalized Walsh–Hadamard codes

Mikhail S. Beshpalov¹, Kirill A. Frolov²✉

¹Vladimir State University, Vladimir, Russia

²JSC “RPC “Istok” named after Shokin”, Fryazino, Russia

Abstract. The paper proposes an optimization method of the Walsh–Hadamard codes, the augmented Walsh code and the p -ary Walsh–Hadamard code, via matrix encryption by a code matrix. The study shows that the upgrade does not affect the process of error detection and correction. Decoding algorithms using code matrices are developed as an addition to list decoding. In the p -ary case, the authors demonstrate the efficiency of the optimization method in handling errors of different types such as substitution, erasure, and appearance of a symbol.

Keywords: block coding, Walsh–Hadamard code, augmented Walsh code, Reed–Muller code, linear permutation, finite field

For citation: Beshpalov M. S., Frolov K. A. Generalized Walsh–Hadamard codes. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(1):101–108. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-1-10>.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] введен усовершенствованный метод кодирования Уолша – Адамара в виде матричного шифрования. Наряду с кодом Уолша – Адамара известен [2] дополненный код Уолша, возможно обобщение [3] метода на базе p -го, а не двоичного, варианта исходного поля чисел. Уже для $p = 3$ это позволяет находить и исправлять ошибки не только типа замещение символа, но и типа стирание или появление символа. Дополненный код Уолша является также кодом Рида – Маллера первого порядка [4]. Покажем реализацию данного усовершенствования применительно к этим методам кодирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Усовершенствованный код Уолша – Адамара. В [1] предложено усовершенствование в виде дополнения (посредством матричного шифрования) к коду Уолша – Адамара. Приведем это усовершенствование кода Уолша – Адамара в более удобном виде, чем предложено в [1].

Зададим последовательность булевых (в поле $\mathbb{F}_2$) матриц C_n размера $n \times 2^n$ по схеме, предложенной в [5, 6], которая отлична от метода в [1]:

$$C_1 = (01), C_{n+1} = \begin{pmatrix} C_n & C_n \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{1}_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{0}_n = (00 \dots 0)$, $\mathbf{1}_n = (11 \dots 1)$ – постоянные вектор-строки с 2^n отсчетами.

По правилам поля $\mathbb{F}_2$ вычислим квадратную матрицу порядка $N = 2^n$ (уровня n) – матрицу Уолша – Адамара в аддитивной форме

$$A_n = C_n^T \cdot C_n, \quad (2)$$

строки которой составляют кодовое пространство в виде множества кодовых слов метода кодирования Уолша (или Уолша – Адамара). Если бы матрицу C_n определили по стандартно принятой в теории кодирования методике (повторенной в [1]) записи в столбцах чисел в двоичной системе в порядке возрастания, то по формуле (2) получили бы ту же матрицу A_n . Преимущества метода задания C_n по формуле (1) проявляются в процессе декодирования,

когда процедура кодирования, описанная в [1], осуществляется через невырожденную (над полем $\mathbb{F}_2$) кодовую матрицу K по формуле

$$A(K) = C_n^T \cdot K \cdot C_n. \quad (3)$$

Матрица $K \cdot C_n$ в (3) служит порождающей матрицей предлагаемого метода. Проверочную матрицу в случае метода кодирования Уолша не рекомендуется использовать из-за ее большого размера $(2^n - n) \times 2^n$.

При кодировании по формуле (3) (вместо (2)) кодовое пространство не меняется. Добавляется шифрование передаваемой информации за счет перестановки множества кодовых слов, что влечет изменение процесса декодирования.

Лемма 1. Верны два утверждения: 1) кодовая матрица K есть главная подматрица $A(K)$, выделенная выборкой $(1, 2, 4, \dots, 2^{n-1})$; 2) позиции информационных символов в кодовых словах указаны в столбцах матрицы K^{-1} .

Первый пункт доказан в [5], второй – в [1]. Нумерация строк и столбцов ведется с нуля, а не с единицы. Термин «главная подматрица» означает, что как строки, так и столбцы выделены из исходной матрицы одной и той же выборкой.

Усовершенствованный дополненный код Уолша

В дополненном коде Уолша число кодовых слов удваивается с сохранением прежнего кодового расстояния, что достигается добавлением к матрице A_n дополнения матрицы A_n . Матрица $\bar{A}_n$ получается из A_n заменой всех элементов матрицы на противоположные в поле $\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$. Строки матрицы $\bar{A}_n$ назовем антистроками, а координаты антистрок – ложными.

В формуле (2) строки матрицы C_n составляют упорядоченный базис множества кодовых слов метода кодирования Уолша. Добавлением к C_n снизу строки $\mathbf{1}_n$ из единиц получаем базис дополненного кода Уолша. Эту матрицу, являющуюся правой половиной матрицы C_{n+1} , обозначим $\tilde{C}_n$.

В качестве аналогичного (3) метода шифрования применительно к дополненному коду Уолша предложим усовершенствование:

$$B(K) = C_n^T \cdot K \cdot \widetilde{C_{n-1}} \quad (4)$$

с невырожденной кодовой матрицей K .

Для усовершенствованного дополненного кода Уолша возникают те же вопросы:

1) Как восстановить кодирующую матрицу K по $B(K)$?

2) Является ли этот метод кодирования систематическим? Как найти информационные координаты в случае положительного ответа?

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление кодовой матрицы

Введем обозначение $\widehat{C_n}$ для левой половины матрицы C_{n+1} . Тогда матрицу C_n можно представить как блочную $C_n = (\widehat{C_{n-1}} | \widehat{C_{n-1}})$.

Лемма 2. Матрица $A(K) = (D(K) | B(K))$ формулы (3) есть блочная матрица с правым блоком $B(K)$ по формуле (4) и с левым блоком $D(K) = C_n^T \cdot K \cdot \widehat{C_{n-1}}$.

Доказательство. В [7] предлагается трактовать j -ю строку произведения двух матриц как линейную комбинацию строк правого сомножителя с коэффициентами в j -й строке левого сомножителя, что и приводит к указанному соотношению.

Обозначим $\tilde{K}$ следующую квадратную матрицу: последний столбец ее нулевой, а предыдущие столбцы есть подматрица матрицы $B(K)$, строки которой выделены выборкой (1, 2, 4, ..., 2^{n-1}), столбцы – выборкой 1, 2, 4, ..., 2^{n-2} . (Символом T обозначим квадратную матрицу того же порядка с одинаковыми столбцами, где образующий столбец выделен той же выборкой (1, 2, 4, ..., 2^{n-1}) из начального столбца матрицы $B(K)$).

Лемма 3. Кодовая матрица K восстанавливается по матрице $B(K)$ по правилу $K = \tilde{K} + T$ в поле $\mathbb{F}_2$.

Доказательство. По лемме 2 столбец с номером 2^{n-1} матрицы $A(K)$ есть начальный столбец матрицы $B(K)$. По лемме 1 последний столбец K выделяется выборкой (1, 2, 4, ..., 2^{n-1}) из начального столбца матрицы $B(K)$ и применяется для построения матрицы T , строки которой имеют вид $\mathbf{0}_{n-1}$ или $\mathbf{1}_{n-1}$.

По свойствам дискретных функций Уолша [6] и лемме 2 половина строк матрицы $B(K)$

повторяют те же строки матрицы $D(K)$, а вторая половина строк матрицы $B(K)$ служит антистроками соответствующих им строк матрицы $D(K)$. Антистрока $\bar{w}$ к строке w уровня $n - 1$ получается сложением в поле $\mathbb{F}_2$ по формуле $w + \mathbf{1}_{n-1} = \bar{w}$, то есть ее координаты меняются на противоположные. Выделенная из $B(K)$ подматрица $\tilde{K}$ (без последнего нулевого столбца) при сравнении с матрицей K состоит из ее строк и антистрок, которым добавлением матрицы T возвращаем вид строк матрицы K .

Восстановление кодируемого сообщения

Дополненный код Уолша не является систематическим. Однако при декодировании этого кода выделяются информативные координаты (0, 1, 2, 4, ..., 2^{n-2}), которые рассматриваем в порядке (1, 2, 4, ..., 2^{n-2} , 0).

Если последняя координата с номером 0 имеет значение 0, то все координаты набора (1, 2, 4, ..., 2^{n-2} , 0) информативные, то есть на этих позициях записано кодируемое сообщение. Если же координата с номером 0 имеет значение 1, то все координаты набора (1, 2, 4, ..., 2^{n-2}) ложно-информационными, то есть на позициях (1, 2, 4, ..., 2^{n-2}) записана антистрока $\bar{w}$, кодируемого сообщения $w = \bar{w} + \mathbf{1}$ (которое здесь без последней координаты, равной 1).

Переформулируем теорему 3 из [1] применительно к принятому в данной статье определению матриц C_n в форме (1).

Лемма 4. Если кодовые сообщения являются строками матрицы C_n^T , то упорядоченными информационными координатами усовершенствованного метода кодирования Уолша – Адамара кодовыми словами $A(K)$ вида (3) будут упорядоченные двоичные числа в столбцах обратной матрицы K^{-1} , прочитанные в инверсной записи (разряды увеличиваются сверху вниз).

Доказательство остается прежним: из предположения $C_n^T = A(K) \cdot T$ вытекает, что $K^{-1} = C_n \cdot T$.

Представим матрицу K^{-1} как блочную, отделив последнюю строку (назвав ее p) и обозначив $\bar{K}$ оставшуюся верхнюю часть матрицы: $K^{-1} = \begin{pmatrix} \bar{K} \\ p \end{pmatrix}$. Координаты последней строки обозначим $p(0), p(1), \dots, p(n - 1)$.

Теорема 1. При декодировании усовершенствованного дополненного кода Уолша с множеством кодовых слов $B(K)$ по формуле (4) номера j_m информативных координат записаны в инверсном порядке в столбцах с номерами m матрицы $\bar{K}$, составляющей верхний блок матрицы K^{-1} . Эти координаты с номерами j_m будут информативными в случаях:

1) $p(m) = 1$ – последняя координата m -го столбца K^{-1} равна 1;

2) $p(m) = 0$ и кодовое слово начинается с нуля ($B_j^0 = 0$), где i – номер наименее удаленного кодового слова.

В случае невыполнения этих условий $p(m) = 0$ и при условии, что наименее удаленное кодовое слово начинается с единицы $B_j^0 = 1$, координаты j_m будут ложно-информационными, что означает необходимость замены их значений на противоположные.

Доказательство. Согласно лемме 4, элементы последней строки $p(m)$ матрицы K^{-1} определяют, на какую часть блочной матрицы $A(K) = (D(K)|B(K))$ указывает m -й столбец матрицы K^{-1} : если этот элемент равен 1, то верхние цифры столбца в инверсной записи есть номер информационного столбца матрицы $B(K)$; если же этот элемент равен 0, то верхние цифры в инверсной записи есть номер j информационного столбца матрицы $D(K)$, которой нет в нашем распоряжении. Зато мы можем указать правило вычисления этого столбца по аналогичному столбцу в матрице $B(K)$.

По правилам индуктивного определения дискретных функций Уолша, исследованным в [5] (представленных в аддитивной форме), столбец с номером $j + 2^{n-1}$ при $j < 2^{n-1}$ есть покоординатная сумма в поле $\mathbb{F}_2$ столбцов с номерами j и 2^{n-1} . Поскольку обратная операция к сложению по модулю два совпадает с исходной, то столбец с номером j есть аналогичная сумма столбцов с номерами $j + 2^{n-1}$ и 2^{n-1} , а данные столбцы присутствуют в матрице $B(K)$ с номерами j и 0. Отсюда вытекает процедура декодирования для усовершенствованного дополненного метода Уолша, которую опишем и продемонстрируем на примере.

Пример 1. Пусть осуществляется процедура кодирования по формуле (4) уровня $n = 4$ с кодовой матрицей

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

для которой

$$K^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ – сразу вычислили и указали обратную.}$$

Процедура кодирования на практике проводится не по формуле (4) сразу для всех возможных кодируемых сообщений C_n^T , а по формуле:

$$R \cdot K \cdot \widetilde{C_{n-1}} = S$$

для потока R входящих сообщений, разбитых на блоки. На выходе получаем не матрицу $B(K)$ всех возможных кодовых слов, а поток S упорядоченных кодовых слов, предназначенный для передачи по каналу связи.

При неустойчивом канале связи получатель принимает сообщение S_0 , вместо S , которое обрабатывается методом декодирования по списку [4]. Сообщение S_0 разбивается на слова длиной 2^{n-1} , каждое из которых сравнивается по критерию минимума расстояния Хэмминга (число разрядов с различающимися символами) со всеми возможными кодовыми словами в виде строк матрицы $C_n \cdot \widetilde{C_{n-1}}$ (или матриц $A_n, \bar{A}_n$), и исправляем. На этапе исправления ошибок, когда по S_0 восстанавливаем S , матрица K не нужна.

Для примера предположим, что ошибки исправлены, и в потоке S получены два следующих кодовых слова: $w_1 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)$ и $w_2 = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$.

Матрицу K^{-1} разобьем на последнюю строку $p = 1010$ и оставшуюся часть матрицы

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В столбцах матрицы K в инверсном порядке записан упорядоченный набор номеров информативных координат: 4, 7, 0, 5. Согласно распределению нулей и единиц в строке p , этот упорядоченный набор запишем в виде информационного кода $4\overline{7}0\overline{5}$.

Поскольку начальная координата слова w_1 равна 0, то упорядоченный набор координат с номерами 4, 7, 0, 5 является информационным для w_1 , что позволяет декодировать первое сообщение $a_1 = (1\ 1\ 0\ 0)$. Так как начальная координата слова w_2 равна 1, то значения координат с номерами 7 и 5, которые выделены рамкой в информационном коде, являются ложно-информационными и подлежат замене на противоположные, что приводит к $a_2 = (1\ 1\ 1\ 1)$.

Усовершенствование p -го варианта

Методы p -го кодирования для простого p , которые изучались в [8], рассмотрим на примере $p = 3$, поскольку основные видоизменения метода реализуются и в этом простейшем случае обобщения. Избыточность кода Уолша уже считается большой. В p -ном случае существенная избыточность, поскольку заменяем n -значные слова на p^n -значные. Будем, по возможности, сохранять прежние обозначения, наполненные новым содержанием.

Рекуррентным правилом, предложенным в [9], определим последовательность матриц C_n размера $n \times 3^n$, где операции в поле $\mathbb{F}_3 = \{0, 1, 2\}$:

$$C_1 = (0\ 1\ 2), \quad C_{n+1} = \begin{pmatrix} C_n & C_n & C_n \\ 0_n & 1_n & 2_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

здесь $0_n = (0\ 0\ \dots\ 0)$, $1_n = (1\ 1\ \dots\ 1)$, $2_n = (2\ 2\ \dots\ 2)$ – постоянные вектор-строки с 3^n отсчетами (уровня n).

Остановимся на p -ном аналоге метода Уолша и его усовершенствования, не привлекая дополненный код.

По правилам поля $\mathbb{F}_3$ вычислим квадратную порядка $N = 3^n$ (уровня n) матрицу

$$A_n = C_n^T \cdot C_n, \quad (6)$$

строки которой составляют кодовое пространство в виде множества S кодовых слов данного метода кодирования.

Усовершенствование метода, состоящее в процедуре матричного шифрования, прове-

дем через невырожденную над полем $\mathbb{F}_3$ кодовую матрицу K по формуле:

$$A(K) = C_n^T \cdot K \cdot C_n. \quad (7)$$

В [9] доказан следующий обратный переход. В данном случае матрица $K \cdot C_n$ в (3) служит порождающей матрицей предлагаемого метода, так же как в случае $p = 2$.

Лемма 5. Кодовая матрица K выделяется из $A(K)$ в виде главной подматрицы выборкой $(1, 3, 9, \dots, 3^{n-1})$ при нумерации с нуля.

Теорема 2. Кодирование по формуле (7) является систематическим. Информационные переменные указаны в столбцах матрицы K^{-1} в инверсном порядке в троичной системе счисления.

Доказательство. Анализируем в поле $\mathbb{F}_3$ соотношения $C_n^T = A(K) \cdot T$ и $K^{-1} = C_n \cdot T$, где матрица T размера $3^n \times n$, в каждом столбце которой одна единица (на разных позициях), а остальные – нули. Так как сомножитель T справа, то каждый столбец T выделяет из первого сомножителя (в виде $A(K)$ или C_n) столбец с указанным номером. В первом равенстве матрица T выделяет из матрицы $A(K)$ информационные столбцы в виде матрицы C_n^T . Поскольку столбцы матрицы C_n следуют в инверсном лексикографическом порядке в алфавите $(0, 1, 2)$, а матрица T выделяет из C_n матрицу K^{-1} , в столбцах которой упорядочены инверсные номера информационных столбцов (координат), то теорема доказана.

Процедура исправления ошибок

Процедура обнаружения ошибок по критерию минимума расстояния Хэмминга (которое указывает количество ошибок) и в p -ном случае остается прежней. А процесс исправления ошибок становится в несколько раз длительнее даже в троичном случае.

Если обнаружена одна ошибка, то методом перебора она исправляется за один или два шага.

Если обнаружены две ошибки, то легко показать, что на их исправление требуется от одного до трех шагов.

В случае трех ошибок предлагается следующий алгоритм исправления. На двух по-

зициях из трех меняем значения и получаем один из трех ответов для d – расстояния Хэмминга между словами. Если $d = 1$ (значения поменяли правильно) или $d = 3$ (на обеих позициях поменяли неверно), то задача сводится к одной ошибке на третьей позиции. Если $d = 2$, то меняем значения на второй и третьей позициях. По пересчитанному значению d выдаем ответ: если $d = 0$, то исправление закончено; если $d = 1$, то исправляем третью позицию; если $d = 2$, то исправляем первую и вторую позиции; если $d = 3$, то исправляем все три позиции. Для исправления потребовалось от двух до трех шагов.

Пример процедуры декодирования

Пример 2. Пусть осуществляется процедура кодирования по формуле (7) уровня $n = 2$ над полем $\mathbb{F}_3$ с кодовой матрицей:

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \text{ Ее обратная } K^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Приведем матрицы (первая по формуле (5)):

$$C_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{и } KC_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Предположим, что получатель декодирует следующий (разбитый на блоки) фрагмент потока полученного сообщения S_0 :

$$\dots 0|0\ 0\ 2\ 2\ 2\ 1\ 1\ 1\ 0|1\ 1\ 0\ 1\ 2\ 2\ 1\ 2\ 0|0\dots$$

По формуле (6) составим все 9 возможных кодовых слов

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

и вычислим расстояние Хэмминга от слова $w_1 = (0\ 0\ 2\ 2\ 2\ 1\ 1\ 1\ 0)$ до каждого из них $\sigma_1 = (6\ 6\ 6\ 6\ 6\ 6\ 3\ 3\ 6)$ путем поэлементного сравнения со строками матрицы (8). Поскольку кодовое расстояние данного кода $d(K) = 6$, то данный код позволяет исправить 2 ошибки. В данном случае ошибок 3 и два кодовых слова на минимальном расстоянии от w_1 . Это слова $(000\ 222\ 111)$ и $(012\ 201\ 120)$. Информационные координаты $(7\ 1)$ вычисляются по матрице K^{-1} и составляют в первом слове сообщение $(1\ 0)$, а во втором слове – $(2\ 1)$. Видимо, предпочтение следует отдать сообщению $(1\ 0)$, поскольку в первом варианте эти координаты не исправлялись, а во втором варианте именно их мы и заменили.

Для второго полученного слова $w_2 = (1\ 1\ 0\ 1\ 2\ 2\ 1\ 2\ 0)$ аналогично вычисляем синдром $\sigma_2 = (7\ 7\ 7\ 6\ 6\ 6\ 5\ 5\ 8)$, что не позволяет даже обнаружить ошибки и указать их число.

Вывод заключается в том, что если рассматриваем ошибки только вида замещения символа, то в данном месте произошел серьезный сбой при передаче информации. В качестве борьбы с подобным явлением запрашивается повтор сообщения.

Если же повтор невозможен, то можно рассмотреть вопрос о наличии ошибок другого вида: удаление или появление символа, что на практике встречается реже.

Для этого сдвинем сначала вправо на один разряд и вычислим σ , а потом влево, повторив вычисления. При сдвиге вправо значение синдрома будет большим, а при сдвиге на один разряд влево получим слова $w_1 = (0\ 0\ 2\ 2\ 2\ 1\ 1\ 1\ 0)$, $w_2 = (0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 2\ 2\ 1\ 2)$ и $\sigma_1 = (6\ 6\ 6\ 6\ 6\ 6\ 0\ 6\ 6)$, $\sigma_2 = (7\ 2\ 6\ 5\ 6\ 5\ 6\ 7\ 5)$. Значит, слово w_1 является кодовым, а в слове w_2 две ошибки, которые легко исправляются до слова $a_1 = (0\ 1\ 2\ 0\ 1\ 2\ 0\ 1\ 2)$.

Делаем вывод, что произошел сбой вида появление одного лишнего символа, за счет чего произошел сдвиг массива S_0 вправо на один разряд.

Информационные координаты с номерами 7 и 1 дают исходные сообщения $(1\ 0)$ и $(1\ 1)$.

Таким образом, излишняя избыточность данного метода позволяет работать с ошибками разного типа.

Число вариантов кодирования

Главное преимущество предложенного усовершенствования – в большом числе способов шифрования. В [9] вычислено число возможных невырожденных матриц K в качестве кодовой матрицы.

Лемма 6. Число невырожденных над полем $\mathbb{F}_3$ матриц K порядка n равно $(3^n - 1)(3^n - 3)(3^n - 9) \dots (3^n - 3^{n-1})$.

В частности, число линейных перестановок уровня 2, совпадающее с числом возможных кодовых матриц, над полем $\mathbb{F}_3$ равно 48; а уровня 3 – равно 11 232. Для уровня 4 число кодовых матриц равно 2 426 112.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное усовершенствование кода Уолша – Адамара в различных видах, сохраняя прежние возможности обнаружения и исправления ошибок типа замещения, добавляет процесс шифрования информации. Кодовая матрица служит секретным ключом, что также позволяет организовать многоканальную систему передачи информации. Если для каждого блока информации применять свой ключ, выбранный истинно случайным обра-

зом, то согласно теореме Шеннона данный алгоритм будет являться абсолютно криптоустойчивым. Если менять матрицу-ключ достаточно часто (не реже чем через каждые $2^{n-1} - 1$ слов для двоичного случая), то вероятность успешной атаки на алгоритм путем шифрования 2^n сообщений e_i , где i -я координата равна 1, остальные равны 0, будет ниже $1/2$.

Большая избыточность кода нивелируется широким спектром возможностей для оптимизации, основанных на структуре кодов Уолша – Адамара. К таким методам оптимизации можно отнести быстрое преобразование Адамара [10], применение PD и s-PD множеств [11–14] для декодирования. В случае p -го варианта кодирования даже при $p = 3$ метод хорошо работает для обнаружения и исправления единичных ошибок других типов, а именно стирания или появления символа.

Дополненный код Уолша встречается также под названием проколотый код Адамара в статье [15], где установлены нижние оценки его арифметической сложности, допускающие перенос на рассмотренное в статье усовершенствование.

Список источников

1. Беспалов М. С., Фролов К. А. Кодирование информации линейными перестановками дискретного преобразования Уолша // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 3. С. 90–95.
2. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979. 744 с.
3. Heng I., Cooke C. H. Error correcting codes associated with complex Hadamard matrices // Applied Mathematics Letters. 1998. Vol. 11, no. 4. P. 77–80.
4. Кузнецов Ю. В., Шкарин С. А. Коды Риды – Маллера (обзор публикаций) // Математические вопросы кибернетики. Вып. 6. М.: Наука, 1996. С. 5–50.
5. Беспалов М. С. Собственные подпространства дискретного преобразования Уолша // Проблемы передачи информации. 2010. Т. 46, № 3. С. 60–79.
6. Беспалов М. С., Скляренок В. А. Дискретные функции Уолша и их приложения. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. 68 с.
7. Малоземов В. Н. Линейная алгебра без определителей. Квадратичная функция. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1997. 80 с.
8. Delsarte P., Goethals J. M. Tri-weight codes and generalized Hadamard matrices // Information and Control. 1969. Vol. 15, no. 2. P. 196–206.

References

1. Bespalov M. S., Frolov K. A. Information encoding by linear permutations of discrete Walsh transform. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(3):90–95. (In Russ.).
2. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. The theory of error-correcting codes. Trans. Moscow: Svyaz; 1979. 744 p. (In Russ.).
3. Heng I., Cooke C. H. Error correcting codes associated with complex Hadamard matrices. *Applied Mathematics Letters*. 1998;11(4):77–80.
4. Kuznetsov J. V., Shkarin S. A. Kody Rida – Mallera (obzor publikatsiy). *Matematicheskie voprosy kibernetiki*. Moscow: Nauka; 1996. No. 6. p. 5–50. (In Russ.).
5. Bespalov M. S. Eigenspaces of the discrete Walsh transform. *Problems of Information Transmission*. 2010;46(3):60–79. (In Russ.).
6. Bespalov M. S., Sklyarenko V. A. Diskretnye funktsii Uolsha i ikh prilozheniya. Vladimir: Izd-vo VISU; 2014. 68 p. (In Russ.).
7. Malozemov V. N. Lineynaya algebra bez opredeliteley. Kvadratichnaya funktsiya. St. Petersburg: Izd-vo SPbSU; 1997. 80 p. (In Russ.).
8. Delsarte P., Goethals J. M. Tri-weight codes and generalized Hadamard matrices. *Information and Control*. 1969;15(2):196–206.

9. Беспалов М. С. Дискретное преобразование Крестенсона // Проблемы передачи информации. 2010. Т. 46, № 4. С. 91–115.
10. Abbe E., Shpilka A., Ye M. Reed-Muller codes: Theory and algorithms // IEEE Transactions on Information Theory. 2020. Vol. 67, no. 6. P. 3251–3277.
11. Key J. D., McDonough T. P., Mavron V. C. Reed-Muller codes and permutation decoding // Discrete Mathematics. 2010. Vol. 310, no. 22. P. 3114–3119.
12. Barrolleta R. D., Villanueva M. Partial permutation decoding for binary linear and Z_4 -linear Hadamard codes // Designs, Codes and Cryptography. 2018. Vol. 86, no. 3. P. 569–586.
13. Bernal J. J., Simón J. J. New advances in permutation decoding of first-order Reed-Muller codes // Finite Fields and Their Applications. 2023. Vol. 88.
14. Bernal J. J., Simón J. J. Permutation decoding of first-order generalized Reed-Muller codes // Journal of Algebra and Its Applications. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.11757>.
15. Li Z., Lin S.-J., Hu H. On the arithmetic complexities of Hamming codes and Hadamard codes // Journal of Latex Class Files. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.09903>.
9. Bespalov M. S. Discrete Chrestenson transform. *Problems of Information Transmission*. 2010;46(4):91–115. (In Russ.).
10. Abbe E., Shpilka A., Ye M. Reed-Muller codes: Theory and algorithms. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2020;67(6):3251–3277.
11. Key J. D., McDonough T. P., Mavron V. C. Reed-Muller codes and permutation decoding. *Discrete Mathematics*. 2010;310(22):3114–3119.
12. Barrolleta R. D., Villanueva M. Partial permutation decoding for binary linear and Z_4 -linear Hadamard codes. *Designs, Codes and Cryptography*. 2018;86(3):569–586.
13. Bernal J. J., Simón J. J. New advances in permutation decoding of first-order Reed-Muller codes. *Finite Fields and Their Applications*. 2023;88.
14. Bernal J. J., Simón J. J. Permutation decoding of first-order generalized Reed-Muller codes. *Journal of Algebra and Its Applications*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.11757>.
15. Li Z., Lin S.-J., Hu H. On the arithmetic complexities of Hamming codes and Hadamard codes. *Journal of Latex Class Files*. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.09903>.

Информация об авторах

М. С. Беспалов – доктор физико-математических наук;

<https://orcid.org/0000-0003-0661-337X>,

bespalov@vlsu.ru

К. А. Фролов – сотрудник;

<https://orcid.org/0000-0001-8691-8151>,

golegoga33rus@gmail.com✉

About the authors

M. S. Bespalov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics);

<https://orcid.org/0000-0003-0661-337X>,

bespalov@vlsu.ru

K. A. Frolov – Employee;

<https://orcid.org/0000-0001-8691-8151>,

golegoga33rus@gmail.com✉

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются
на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных
Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются
в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 13.04.2026.