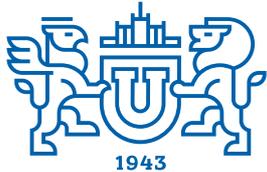


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2024
Т.24, № 2

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

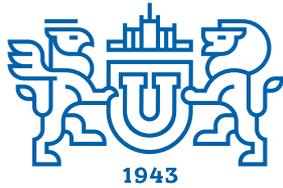
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

Редакционная коллегия:

Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (гл. редактор) (г. Челябинск);
Бурков В.Н., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Москва);
Голлай А.В., д.т.н., доц. (зам. гл. редактора) (г. Челябинск);
Захаров В.В., отв. секретарь (г. Челябинск);
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (г. Воронеж);
Березанский Л., PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Куликов Г.Г., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (г. Уфа);
Мазуров В.Д., д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);
Прангишвили А.И., д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);
Щепкин А.В., д.т.н., проф. (г. Москва);
Ячиков И.М., д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

Редакционный совет:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (председатель) (г. Челябинск);
Авербах И., PhD, проф. (г. Торонто, Канада);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);
Панферов В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Слинько А., PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Танана В.П., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ухоботов В.И., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ушаков В.Н., д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);
Шестаков И., д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);
Ширяев В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Шнайдер Д.А., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2024

Vol. 24, no. 2

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

Editorial Board:

Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Burkov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Gollai A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

Kulikov G.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;

Mazurov V.D., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

Shechepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Averbakh I., PhD, Prof., University of Toronto, Canada;

Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;

Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

Tanana V.P., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ukhobotov V.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

Shiryayev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

КРОМИНА Л.А. Концепция формирования структуры цифрового двойника для учета значимости приобретаемой литературы в системе комплектования библиотечного фонда университета 5

ПАРАСИЧ В.А., ПАРАСИЧ И.В., ВОЛОВИЧ Г.И., НЕКРАСОВ С.Г., ПАРАСИЧ А.В. Переобучение в машинном обучении: проблемы и решения 18

Управление в технических системах

СТОЛБОВ В.Ю., НЕТБАЙ Г.В. Прогнозное управление системой теплоснабжения города с использованием линейной регрессии и модели градиентного бустинга 28

ТЕЛЕГИН А.И., ГУСЕВ Е.В., ВОЛОВИЧ Г.И., НЕКРАСОВ С.Г. Формализм решения первой задачи динамики шагающих и колесно-шагающих машин 39

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

КАЗАРИНОВ Л.С., КОЛОСОВА З.А., АБДУЛЛИН В.В., ШНАЙДЕР Д.А. Подход к оценке частоты спектральной составляющей цифрового сигнала по спектру с низким разрешением 56

Управление в социально-экономических системах

МУСТАЕВ И.З., МАКСИМОВА Н.К., МУСТАЕВА Д.И. Рекомендации по оценке эффективности инновационных проектов 65

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГОЛЛАЙ А.В., МАКСИМОВ А.А., ГУСЕВ Е.В., ЩЕМЛЕВ М.В. Использование метода Z-DEMATEL для анализа проблем управления кадрами отечественных машиностроительных предприятий 76

БАРКАЛОВ С.А., АВДЕЕВА Е.А., АВЕРИНА Т.А., КАЛИНИНА Н.Ю. Новые роли работников в условиях цифровой трансформации промышленности 87

ЩЕПКИН А.В., ЛИХОЛИП М.П., БОГДАНОВ А.Д. О моделировании закупки образовательного оборудования и бюджетной конкуренции школ 97

Краткие сообщения

ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Методика оценки квалификации и личных качеств руководящего состава промышленного предприятия и его структурных подразделений 107

Персоналии

Памяти Геннадия Григорьевича Куликова 114

CONTENTS

Informatics and computer engineering

- KROMINA L.A. The concept of forming a digital twin structure to take into account the significance of purchased literature in the system of acquisition of the book collection of the university library 5
- PARASICH V.A., PARASICH I.V., VOLOVICH G.I., NEKRASOV S.G., PARASICH A.V. Overfitting in machine learning: problems and solutions 18

Control in technical systems

- STOLBOV V.Yu., NETBAY G.V. Predictive control of the city heat supply system using linear regression and gradient boosting model 28
- TELEGIN A.I., GUSEV E.V., VOLOVICH G.I., NEKRASOV S.G. Formalism for solving the first problem of the dynamics of walking and wheel-walking machines 39

Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

- KAZARINOV L.S., KOLOSOVA Z.A., ABDULLIN V.V., SHNAYDER D.A. An approach to estimating the frequency of spectral component by low-resolution spectrum of digital signal 56

Control in social and economic systems

- MUSTAEV I.Z., MAKSIMOVA N.K., MUSTAEVA D.I. Recommendations for evaluating the effectiveness of innovative projects 65
- LOGINOVSKIY O.V., HOLLAY A.V., MAKSIMOV A.A., GUSEV E.V., SHCHEMLEV M.V. Using the Z-DEMATEL method to analyze the problems of personnel management of domestic machine-building enterprises 76
- BARKALOV S.A., AVDEEVA E.A., AVERINA T.A., KALININA N.Yu. New roles of employees in the conditions of digital transformation in industry 87
- SHCHEPKIN A.V., LIKHOLIP M.P., BOGDANOV A.D. Procurement of educational equipment and budget competition modeling 97

Brief reports

- LOGINOVSKIY O.V. Methodology for assessing the qualifications and personal qualities of management staff at an industrial enterprise and its structural subdivisions 107

Personalia

- In memory of Gennady Grigorievich Kulikov 114

Информатика и вычислительная техника

Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.8

DOI: 10.14529/ctcr240201

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ УЧЕТА ЗНАЧИМОСТИ ПРИОБРЕТАЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В СИСТЕМЕ КОМПЛЕКТОВАНИЯ БИБЛИОТЕЧНОГО ФОНДА УНИВЕРСИТЕТА

Л.А. Кромина, luyda-kr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5226-0512>

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Сфера высшего образования, включая библиотечные процессы, на сегодняшний день функционирует при тесном взаимодействии с информационными системами, среди которых особо результативными представляются информационные системы, построенные на технологии искусственного интеллекта. Реализуемый университетом учебный процесс и научные изыскания находятся в прямой зависимости от качественных и количественных характеристик процесса комплектования книжного фонда. В связи с этим актуальным является возможный способ применения цифрового двойника, основанного на технологии искусственного интеллекта, как инструмента интеллектуального управления при составлении заказа литературы для университета путем ранжирования заказываемых изданий по показателям содержательной значимости, на основе принципов информационной равноценности и неравноценности значимых ссылок. **Цель исследования.** Обсуждаются структуры предлагаемого цифрового двойника, примеры вычисления рейтингов изданий, предложенных издательствами к покупке. **Материалы и методы.** Проанализированы принципы информационной равноценности, согласно которым все значимые ссылки обладают одинаковой информативной значимостью, и информационной неравноценности, содержание которых заключается в назначении информационного веса, вычисляемого на основе индексов цитирования авторов ссылающегося издания, каждой ссылке, выполненной сотрудниками университета. **Результаты.** Разработаны модели нейронных сетей, приводящие в исполнение цифровой двойник и предоставляющие возможность определения значимости литературы, представленной к приобретению, которые планируется рассматривать в качестве основных в процессе реализации интеллектуальной системы формирования заказа литературы, характеризующиеся оптимальными показателями. Предлагается использование алгоритма обучения с учителем, где входящей информацией является обучающий спектр данных, которые нейронная сеть получает, а затем распознает зависимости и корректно реагирует на поступающий тестовый набор данных. После полного обучения нейронной сети учителя планируется отключить, что предоставит возможность нейронной сети работать самостоятельно. **Заключение.** Функциональные возможности разработанных абстрактных моделей нейронных сетей могут быть расширены на предмет учета рейтинговых, качественных (по тематике публикаций), количественных (по наименованиям и видам изданий, стоимости заказа с доставкой и др.) показателей, а также определения количества экземпляров заказываемых изданий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровой двойник, заказ литературы, литературная ссылка, база значимых ссылок, индекс цитирования, рейтинг издания, парсер, узел нейронной сети

Для цитирования: Кромина Л.А. Концепция формирования структуры цифрового двойника для учета значимости приобретаемой литературы в системе комплектования библиотечного фонда университета // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 5–17. DOI: 10.14529/ctcr240201

THE CONCEPT OF FORMING A DIGITAL TWIN STRUCTURE TO TAKE INTO ACCOUNT THE SIGNIFICANCE OF PURCHASED LITERATURE IN THE SYSTEM OF ACQUISITION OF THE BOOK COLLECTION OF THE UNIVERSITY LIBRARY

L.A. Kromina, luyda-kr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5226-0512>
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. The sphere of higher education, including library processes, nowadays functions in close interaction with information systems, among which information systems based on artificial intelligence technology seem to be especially effective. Implemented by the university educational process and scientific research are directly dependent on the qualitative and quantitative characteristics of the acquisition process of the book collection. In this regard, relevant is a possible way to use a digital twin, based on artificial intelligence technology, as a tool of intelligent management in the preparation of an order of literature for the university, by ranking the ordered publications on the indicators of informational relevance, based on the principles of information equivalence, and the unequal value of meaningful references. **Research Objective.** Discusses the structures of the proposed digital twin, examples of calculating the rankings of publications offered by publishers for purchase. **Materials and methods.** The authors analyze the principles of information equivalence, according to which all the significant references have the same informative value, and the principles of information inequality, which consist in assigning informational weight (calculated on the basis of citation indices of authors of the refereed publication) to each reference made by the university staff. **Results.** Developed models of neural networks, which perform a digital twin and provide the possibility of determining the importance of the literature submitted for purchase, which is planned to be considered as the main in the process of implementation of the intelligent system of formation of the order of the literature, characterized by the optimum performance. We propose the use of a learning algorithm with a teacher, where the input is a training spectrum of data, which the neural network receives and then recognizes dependencies and correctly responds to the incoming test data set. Once the neural network is fully trained, it is planned to disable the teacher, which will allow the neural network to work independently. **Conclusion.** The functionality of the developed abstract models of neural networks can be expanded to account the rating, qualitative (on the topics of publications), quantitative (by titles and types of publications, the cost of the order with delivery, etc.), as well as to determine the number of copies of the ordered publications.

Keywords: artificial intelligence, digital twin, literature ordering, literature citation, significant citation database, citation index, publication ranking, parser, neural network node

For citation: Kromina L.A. The concept of forming a digital twin structure to take into account the significance of purchased literature in the system of acquisition of the book collection of the university library. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(2):5–17. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240201

Введение

На сегодняшний день сфера высшего образования неразрывно связана с применением информационных систем, предназначенных для обработки больших объемов данных и принятия решений. Среди множества таких систем наиболее актуальными и эффективными являются системы, основанные на технологиях искусственного интеллекта [1].

Организация библиотечных процессов вуза также выполняется с использованием современных средств автоматизации. При этом процесс комплектования книжного фонда, требующий решения нетривиальной и трудозатратной задачи составления заказа на литературу по каталогам издательств, является важным для высшей школы, поскольку качественное и количественное содержимое каждого формируемого заказа оказывает прямое воздействие на выполнение учебного процесса и научных исследований.

С целью реализации интеллектуальных способностей, связанных с анализом и обобщением данных, представленных в каталогах издательств, и в конечном итоге принятия оптимального решения по содержанию заказа возникает задача создания цифрового двойника, основанного на

концепции искусственного интеллекта в виде нейронной сети, которую в дальнейшей перспективе можно обучить выполнению других библиотечных процессов вуза.

Создание цифрового двойника следует начинать с разработки его структуры, рассматриваемой в рамках данной статьи на основе принципа информационной равноценности, когда все значимые ссылки обладают равной информативной значимостью [2–6], а также на основе принципа информационной неравноценности, согласно которому каждой ссылке, выполненной сотрудниками университета, назначается информационный вес, вычисляемый на основе индексов цитирования авторов ссылающейся публикации [7].

1. Оптимизация заказа литературы для университета в соответствии с принципом информационной равноценности значимых ссылок

Работа ранее представленной автоматизированной системы поддержки принятия решений, реализованной на базе информационных потребностей сотрудников университета, представленных в виде показателей важности содержания [8], основана на принципе информационной равноценности значимых ссылок.

Согласно предложенному подходу, формирование оптимального заказа литературы является возможным при соблюдении следующих условий:

1) ведение базы значимых ссылок, хранящей информацию о цитируемых публикациях изданиями сотрудников университета, учитывая наименование издания, список авторов, а также перечень специальностей/направлений подготовки для каждой ссылки;

2) организация специальных требований и дополнительных запросов в издательства или анализ контента сайта научной электронной библиотеки eLibrary.ru. с целью получения списков литературы изданий, содержащихся в каталогах издательств.

Так, параметр литературной ссылки $\sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$ приравнивается к единице только в случае наличия литературной ссылки между цитирующим изданием \tilde{T}_μ и ссылочным источником T_η . Определение данного параметра выполняется следующим образом:

$$\sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta) = \begin{cases} 1, & \text{если издание наименования } \tilde{T}_\mu \text{ цитирует издание } T_\eta, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь μ – порядковый номер ссылающегося издания, причем $\mu = (\overline{1, \dots, a})$, где a – количество ссылающихся изданий;

η – порядковый номер ссылочного источника, причем $\eta = (\overline{1, \dots, b})$, где b – количество ссылочных источников.

В случае, когда из всех авторов ссылающегося издания \tilde{T}_μ хотя бы один с порядковым номером ω трудоустроен в университете, литературная ссылка будет являться значимой, а параметр локализации литературы по авторам $\alpha(\tilde{T}_\mu)$ эквивалентен единице, т. е.

$$\alpha(\tilde{T}_\mu) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\exists \omega)((1 \leq \omega \leq k(\tilde{T}_\mu)) \wedge (\gamma(\omega, \tilde{T}_\mu) = 1)), \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь $k(\tilde{T}_\mu)$ – число авторов \tilde{T}_μ ;

$\gamma(\omega, \tilde{T}_\mu)$ – параметр локализации автора ω издания \tilde{T}_μ ;

$$\gamma(\omega, \tilde{T}_\mu) = \begin{cases} 1, & \text{если автор издания } \tilde{T}_\mu \text{ с номером } \omega \text{ работает в университете,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Просуммировав значимые ссылки на ссылочное издание с наименованием T_η всех ссылающихся изданий \tilde{T}_μ по специальности/направлению подготовки, реализуемой в университете m , изданных под авторством сотрудников университета, можно вычислить значения локальных индексов цитирования $I(T_\eta, m)$ согласно формуле

$$I(T_{\eta}, m) = \sum_{\substack{\langle \tilde{T}_{\mu} \rangle \\ (\delta(\tilde{T}_{\mu}, m)=1)}} \sigma(\tilde{T}_{\mu}, T_{\eta}).$$

Здесь $\delta(\tilde{T}_{\mu}, m)$ – параметр специализации литературы такой, что:

$$\delta(\tilde{T}_{\mu}, m) = \begin{cases} 1, & \text{если издание наименования } \tilde{T}_{\mu} \text{ относится} \\ & \text{к специальности / направлению подготовки } m, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Исходя из вышеизложенного, формулировка принципа равноценности значимых ссылок заключается в том, что необходимость любого издания, предложенного к приобретению в каталогах, для университета может быть представлена в виде совокупности значений локальных индексов цитирования, рассчитанных для каждого источника, указанного в списке литературы цитирующего издания и представленного при этом в базе значимых ссылок.

Исходя из этого, если сотрудники университета процитировали какое-либо издание базы значимых ссылок 4 раза, то величина локального индекса цитирования будет равна 4.

В случае выявления в публикациях сотрудников вуза новых цитирований изданий из базы значения локальных индексов цитирования могут варьироваться, поэтому при составлении каждого отдельного заказа литературы для университета эти показатели следует пересчитывать.

Осуществлять оценку информационной значимости новых изданий на объективной основе по каждой из реализуемых специальностей/направлений подготовки, а также университета в целом предлагается путем применения локального и общего рейтинга соответственно.

Так, если по всем находящимся в списке литературы изданиям $T(i, j)$, предложенным издательством к приобретению изданиям T_{η} просуммировать локальные индексы цитирования

$I(T_{\eta}, m)$, то можно получить величину локального рейтинга $R^*(i, j, m)$:

$$R^*(i, j, m) = \sum_{\substack{\langle T_{\eta} \rangle \\ \sigma(T(i, j), T_{\eta})=1}} I(T_{\eta}, m).$$

Суммарное значение локальных рейтингов для каждого издания $R^*(i, j, m)$ по всем специальностям/направлениям подготовки m , реализуемым в университете, в свою очередь, позволяет рассчитать величину общего рейтинга того же издания, т. е.

$$R(i, j) = \sum_{m=1}^O R^*(i, j, m).$$

Общий рейтинг является основным показателем математической модели, предоставляющей возможность генерирования заказа литературы для библиотеки университета с оптимальными характеристиками. Данная математическая модель содержит целевые функции, а также совокупность ограничений, к которым относятся количественные (по названиям и видам изданий, стоимости заказа с доставкой и др.), качественные (по тематике изданий) и рейтинговые.

При этом целевые функции математической модели отвечают требованиям, изложенным в Федеральных государственных образовательных стандартах для сферы высшего образования и представленным в качестве критериев эффективности:

- 1) достижение наиболее полного соответствия объективным информационным потребностям сотрудников университета;
- 2) получение рекордно-возможной номенклатуры;
- 3) приобретение предельного количества экземпляров заказываемых изданий.

Основная целевая функция математической модели, позволяющей оптимизировать заказ литературы, обеспечивает наиболее полное соответствие объективным информационным потребностям сотрудников университета согласно требованиям, представленным в первом критерии эффективности, ввиду того, что основана на получении предельного показателя общего рейтинга для всех наименований заказываемых изданий:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} R(i, j) \cdot f(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}.$$

Здесь N – общее количество издательств, $K(i)$ – количество наименований изданий в каталоге i -го издательства, а $f(i, j)$ – параметр пополнения номенклатуры заказа изданием j , предлагаемым к приобретению в издательстве i . Величина указанного параметра будет принимать значение, равное единице, – исключительно для первого экземпляра каждого издания при поочередном переборе, и нулю – для всех остальных экземпляров того же издания.

Вторая целевая функция позволяет обеспечить получение рекордно возможной номенклатуры посредством поиска решений среди множества отличных от нуля результатов основной целевой функции задачи, что можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} f(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}.$$

Третья целевая функция позволяет получить предельно возможное количество экземпляров:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} X(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}.$$

Здесь $X(i, j)$ – количество экземпляров книги j -й книги, заказываемое у i -го издательства, причем $X(i, j) \geq 0$, $X(i, j) \in Z$.

Таким образом, система поддержки принятия решений, основанная на ранжировании изданий, предлагаемых издательствами к приобретению, на которые ссылаются в своих изданиях сотрудники университета, позволяет сгенерировать заказ литературы для библиотеки, являющийся оптимальным, что обеспечивает повышение эффективности процесса комплектования, а также удовлетворение информативных потребностей сотрудников университета [2–6].

Функционирование данной системы осуществляется на базе комплекса алгоритмов, которые позволяют выполнять математические расчеты, обрабатывать данные и в результате – генерировать оптимальный заказ на литературу для университета. Однако применение цифрового двойника, основанного на технологии искусственного интеллекта и представленного в виде узла нейронной сети, для решения задачи генерации заказа на литературу по каталогам издательств позволит не только сократить время решения поставленной задачи, но и обучать систему с целью расширения функциональных возможностей [9, 10].

2. Структура узла нейронной сети согласно принципу информационной равноценности значимых ссылок

Структура цифрового двойника, представленного в виде узла нейронной сети, построенная в соответствии с принципом информационной равноценности значимых ссылок (рис. 1), состоит из шести слоев.

Входами являются библиографические литературные ссылки между ссылающимися изданиями \tilde{T}_μ и ссылочными источниками $T_\eta - \sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$, каждой из которых в роли веса предопределена величина параметра локализации литературы по авторам – $\alpha(\tilde{T}_\mu)$, по этим показателям в первом слое нейрона вычисляется значимость литературных ссылок между ссылающимися изданиями и ссылочными источниками. Второй слой позволяет определить конкретные значения значимых литературных ссылок в зависимости от параметров специализации литературы – $\delta(\tilde{T}_\mu, m)$, получаемых в качестве веса.

После того как значения ссылок определены, выполняется переход к третьему слою, предназначенному для вычисления локальных индексов цитирования для каждого из изданий базы значимых ссылок – $I(T_\eta, m)$. Полученные значения при наличии литературных ссылок изданий наименования T_η , на которые ссылается издание с наименованием $T(i, j) - \sigma(T(i, j), T_\eta)$, указываемых в роли весов, переопределяются в четвертом слое нейрона и в дальнейшем применяются для определения локальных рейтингов изданий, предложенных к приобретению – $R^*(i, j, m)$ в пятом слое сети.

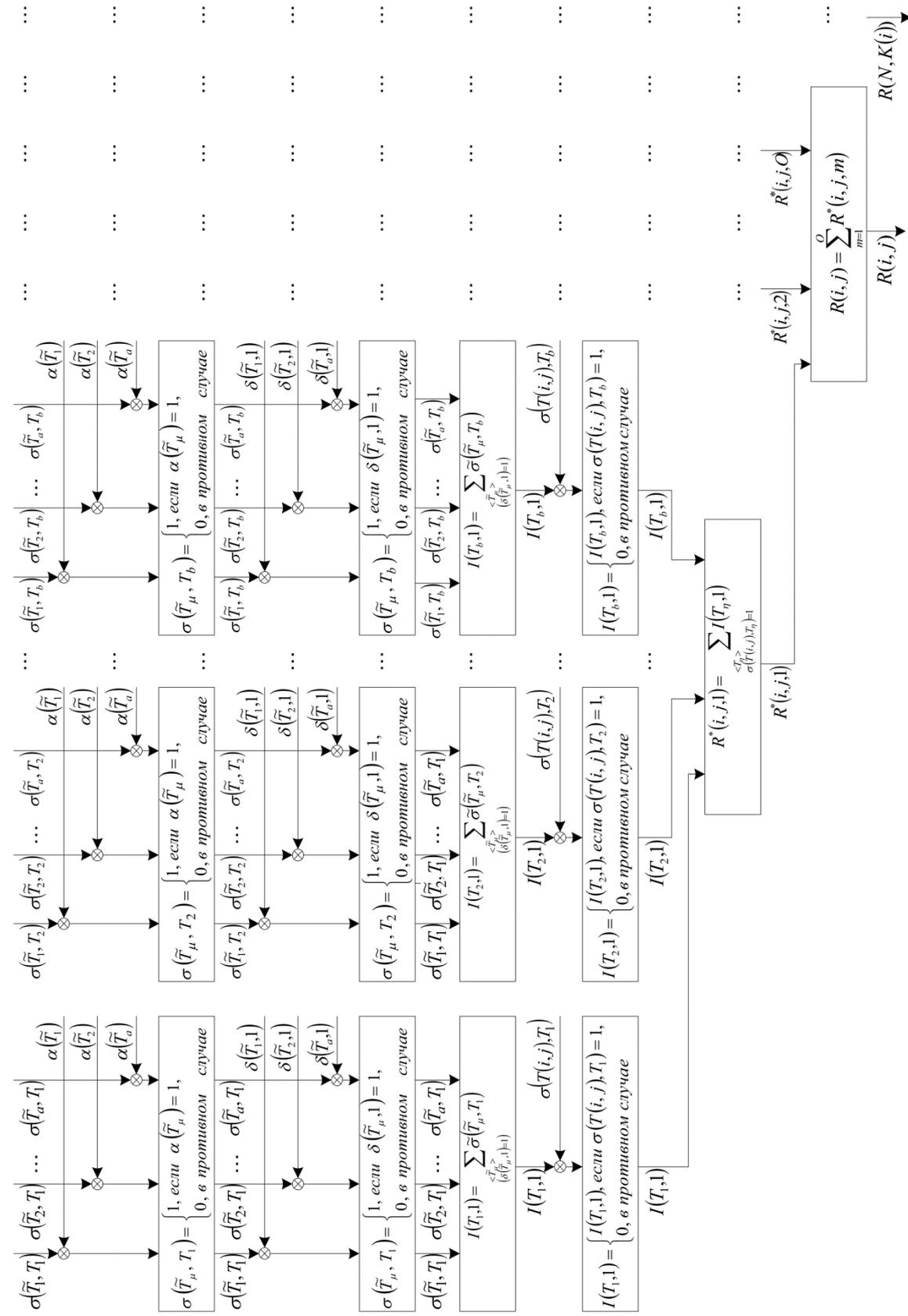


Рис. 1. Схема узла нейронной сети согласно принципу информационной равноценности значимых ссылок
Fig. 1. Neural network node diagram according to the principle of information equivalence of significant links

Шестой слой предназначен для вычисления значений общих рейтингов для каждого издания, предлагаемого к покупке – $R(i, j)$, которые поступают на выход узла нейронной сети.

По результатам работы представленного узла нейронной сети формируется сообщение, содержащее информацию о значениях общих рейтингов каждого издания из каталогов, пример вычисления которых согласно принципу информационной равноценности рассмотрен ранее [3].

3. Подход к оптимизации заказа литературы для университета согласно принципу информационной неравноценности значимых ссылок

В соответствии с подходом к оптимизации заказа литературы для университета, основанным на принципе информационной равноценности, все ссылки, охарактеризованные как значимые, обладают информационной важностью в равной степени, исходя из этого каждая из таких ссылок при расчете индексов цитирования и рейтингов изданий может принимать единичное значение. Это положение предлагается заменить принципом ссылочной неравноценности, смысл которого заключается в том, что объективные информационные потребности сотрудников университета определяются еще более точно в целях усовершенствования предлагаемого подхода к заказу книжных изданий [7]. Выполнение данного принципа предусматривает то, что для каждой значимой ссылки будет установлена информационная ценность (информационный вес), в основе расчетов которой находятся величины индексов Хирша [11–13] авторов ссылающегося издания, применяемые для оценки потребности университета в ссылочном издании.

Показатели индексов цитирования авторов находятся в свободном доступе публичных баз данных, таких как e-library.ru, РИНЦ, ядро РИНЦ, Web of Science, Scopus, и, следовательно, необходимость их хранения в системе заказа отсутствует, поскольку существует возможность их получения с помощью синтаксического анализатора, реализованного в форме парсера на языке высокого уровня, например, Python.

В целях достижения объективности информационной ценности значимых ссылок предлагается учитывать следующие требования.

1. Информационная ценность ссылок, выполненных авторами, не являющимися сотрудниками вуза, приравнивается к нулевому значению (разграничение информативных потребностей).

2. Информационная ценность значимой ссылки, сделанной сотрудниками университета с нулевыми значениями индексов цитирования, принимает положительное значение (учет информативных потребностей начинающих авторов).

3. Применение индекса цитирования авторов без учета самоцитирований (исключение само-рекламы при определении потребностей университета).

4. Увеличение информационной ценности каждой ссылки обусловлено повышением значений индексов цитирования любого автора цитирующего издания, трудоустроенного в университете (восприимчивость информативных потребностей университета к спросу на издания сотрудников).

5. Увеличение численности авторов университета, цитирующего издания, не приводит к повышению информативной ценности его цитирования (защита от искусственного завышения информационных потребностей посредством приписывания авторства).

Соблюдение изложенных требований полностью не может исключить фиктивного завышения индексов цитирования авторов, а следовательно, и не гарантирует того, что информативные потребности сотрудников университета по назначаемым таким образом информационным ценностям значимых ссылок будут определены объективно.

Однако применение наукометрических показателей предоставляет возможность получения более объективного решения задачи составления заказа на литературу для университета по каталогам издательств по сравнению с применением методов экспертных оценок [14, 15] или с привлечением сотрудников университета в роли экспертов на добровольной основе.

В соответствии с предлагаемым подходом такие показатели, как параметр литературной ссылки $\sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$, параметр локализации литературы по авторам $\alpha(\tilde{T}_\mu)$, а также параметр локализации автора ω издания $\tilde{T}_\mu - \gamma(\omega, \tilde{T}_\mu)$ не теряют своей актуальности.

Помимо этого, вводится функция информационной ценности литературной ссылки $\tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$ согласно указанным требованиям, принимающая одно из трех потенциально-возможных значений:

– если издание \tilde{T}_μ ссылается на издание T_η (т. е. $\sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta) = 1$) и хотя бы один из индексов отличен от нуля, то информационная ценность литературной ссылки равна среднему арифметическому индексов цитирования $h(\omega, \tilde{T}_\mu)$ всех авторов ω издания \tilde{T}_μ , трудоустроенных в университете (для которых $\gamma(\omega, \tilde{T}_\mu) = 1$);

– если издание \tilde{T}_μ ссылается на издание T_η и индекс цитирования $h(\omega, \tilde{T}_\mu)$ всех авторов ω издания \tilde{T}_μ , являющихся сотрудниками университета, принимает нулевое значение, то информационная ценность литературной ссылки равна единице;

– во всех остальных случаях информационная ценность литературной ссылки равна нулю.

Вычислить значение информационной ценности литературной ссылки – $\tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$ с учетом параметров литературной ссылки $\tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$ и локализации литературы $\alpha(\tilde{T}_\mu)$ позволяет следующая формула:

$$\tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta) = \begin{cases} \frac{\sum_{\omega=1}^{k(\tilde{T}_\mu)} h(\omega, \tilde{T}_\mu) \cdot \gamma(\omega, \tilde{T}_\mu)}{\sum_{\omega=1}^{k(\tilde{T}_\mu)} \gamma(\omega, \tilde{T}_\mu)} \cdot \sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta), & \text{если } \exists \omega' (1 \leq \omega' \leq k(\tilde{T}_\mu)) \wedge \\ & \wedge (\gamma(\omega', \tilde{T}_\mu) = 1) \wedge (h(\omega', \tilde{T}_\mu) > 0); \\ \sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta), & \text{если } \forall \omega' ((1 \leq \omega' \leq k(\tilde{T}_\mu)) \wedge (\gamma(\omega', \tilde{T}_\mu) = 1) \Rightarrow (h(\omega', \tilde{T}_\mu) = 0)); \\ 0, & \text{если } \alpha(\tilde{T}_\mu) = 0. \end{cases}$$

Согласно представленной формуле, если из троих авторов, значения индексов Хирша без учета самоцитирования которых соответственно равны 4, 6 и 7, только первые два являются сотрудниками вуза, то для данного издания информационная ценность любой литературной ссылки будет равна 5.

Если каждый из троих авторов трудоустроен в университете и имеет нулевое значение индекса Хирша без учета самоцитирования, то информационная ценность любой литературной ссылки такого издания будет принимать значение параметра литературной ссылки.

И если ни один из авторов ссылающейся публикации не является сотрудником университета, то информационная ценность любой литературной ссылки такого издания будет равна нулю.

Следующим шагом является вычисление локального взвешенного индекса цитирования $\tilde{I}(T_\eta, m)$ для каждого источника T_η из базы значимых ссылок. Данный показатель предлагается вычислять, применяя формулу

$$\tilde{I}(T_\eta, m) = \sum_{\substack{\langle \tilde{T}_\mu \rangle \\ (\delta(\tilde{T}_\mu, m) = 1)}} \tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta).$$

Здесь $\delta(\tilde{T}_\mu, m)$ – параметр специализации литературы такой, что:

$$\delta(\tilde{T}_\mu, m) = \begin{cases} 1, & \text{если издание наименования } \tilde{T}_\mu \text{ относится} \\ & \text{к специальности / направлению подготовки } m; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

К примеру, если на какое-либо издание, представленное в базе значимых ссылок, было выполнено 4 ссылки, со значениями информационной ценности соответственно равными 2, 3, 4 и 7, то величина локального взвешенного индекса цитирования для рассматриваемого издания будет равна 16.

Значения взвешенных индексов цитирования могут изменяться по одной из двух причин как в связи с возникновением новых ссылок на издания, указанные в базе значимых ссылок, которые цитируют сотрудники университета в своих публикациях, так и в связи с изменением значений индексов Хирша авторов. Варьирование значений взвешенных индексов цитирования необходимо учитывать в процессе вновь формируемого варианта заказа литературы для университета.

Таким образом, если по всем изданиям T_η , указанным в списке литературы издания $T(i, j)$, предложенного издательством к приобретению, просуммировать локальные взвешенные индексы цитирования – $\tilde{I}(T_\eta, m)$, то можно определить значение локального взвешенного рейтинга – $\tilde{R}^*(i, j, m)$:

$$\tilde{R}^*(i, j, m) = \left[\sum_{\substack{\langle T_\eta \rangle \\ \sigma(T(i, j), T_\eta) = 1}} \tilde{I}(T_\eta, m) \right].$$

Совокупность локальных взвешенных рейтингов для каждого издания $\tilde{R}^*(i, j, m)$ по всем специальностям/направлениям подготовки m , реализуемым в университете, в свою очередь, позволяет рассчитать значение общего взвешенного рейтинга того же издания, т. е.

$$\tilde{R}(i, j) = \sum_{m=1}^O \tilde{R}^*(i, j, m).$$

Представленный показатель по аналогии с его невзвешенным аналогом является основным в математической модели, предназначенной для формирования заказа литературы, характеризующегося оптимальными показателями, соответствующими заданным критериям эффективности и набору ограничений.

Реализация рассмотренного принципа также предусматривает построение цифрового двойника, основанного на технологии искусственного интеллекта и представленного в виде узла нейронной сети.

4. Структура узла нейронной сети согласно принципу информационной неравноценности значимых ссылок

В соответствии с принципом информационной неравноценности значимых ссылок структура цифрового двойника, представленного в виде узла нейронной сети (рис. 2), также состоит из шести слоев.

Однако в отличие от нейронной сети, предложенной для реализации принципа информационной равноценности (см. рис. 1), функционирование данного узла основано на предиктивной аналитике, поскольку такие показатели, как индексы цитирования авторов предлагается получать из внешних баз данных через реализацию парсера, а в дальнейшем обрабатывать их нейронной сетью с целью достижения конечного результата.

Входами нейронной сети помимо литературных ссылок между цитирующими публикациями \tilde{T}_μ и ссылочными источниками $T_\eta - \sigma(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$, каждой из которых в роли веса поступает значение параметра локализации литературы по авторам $\alpha(\tilde{T}_\mu)$, в отличие от представленного ранее (см. рис. 1) являются индексы цитирования $h(\omega, \tilde{T}_\mu)$ каждого автора ω издания \tilde{T}_μ , в роли весов при этом выступают параметры локализации каждого автора ω издания $\tilde{T}_\mu - \gamma(\omega, \tilde{T}_\mu)$. По полученным показателям в первом слое нейрона вычисляются значения информационной ценности литературных ссылок $\tilde{\sigma}(\tilde{T}_\mu, T_\eta)$ между цитирующими публикациями и ссылочными источниками. Второй слой нейронной сети позволяет определять значения литературных ссылок в зависимости от параметров специализации литературы – $\delta(\tilde{T}_\mu, m)$, получаемых в качестве весовых показателей.

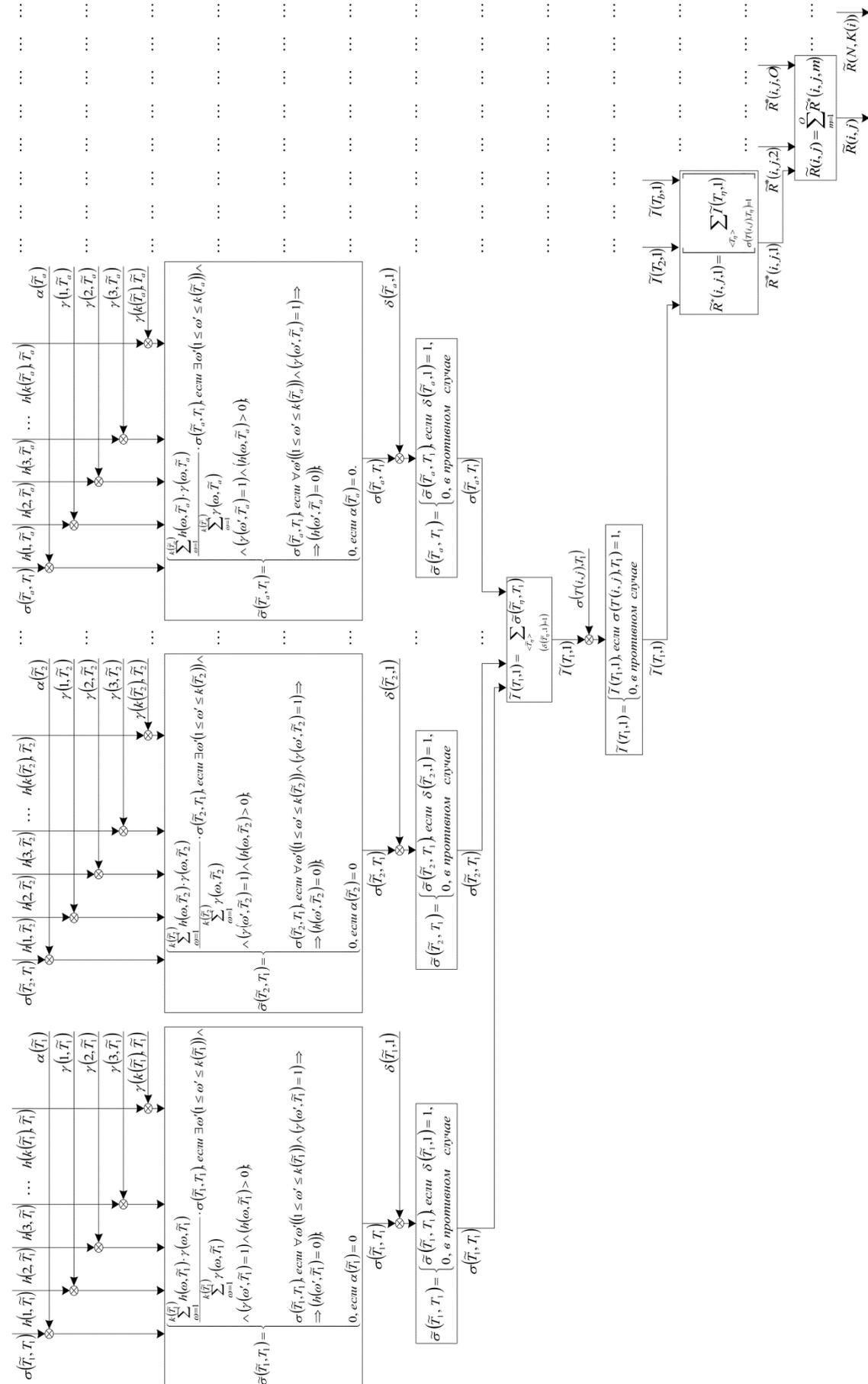


Рис. 2. Схема узла нейронной сети согласно принципу информационной неравноценности значимых ссылок
Fig. 2. Neural network node diagram according to the principle of information inequality of significant links

Третий слой, в свою очередь, предназначен для вычисления локальных взвешенных индексов цитирования для каждой публикации из базы значимых ссылок – $\tilde{I}(T_{\eta}, m)$. Полученные значения при наличии литературных ссылок изданий наименования T_{η} , на которые ссылается издание с наименованием $T(i, j) - \sigma(T(i, j), T_{\eta})$, указываемых в роли весов, переопределяются в четвертом слое нейрона, а в пятом слое применяются для определения локальных взвешенных рейтингов изданий, предложенных к приобретению – $\tilde{R}^*(i, j, m)$.

Шестой слой призван выполнять вычисление значений общих взвешенных рейтингов для каждого издания, предлагаемого к покупке – $\tilde{R}(i, j)$. Полученные значения поступают на выход узла нейронной сети.

В результате работы нейронной сети формируется сообщение, содержащее значения общих взвешенных рейтингов каждого издания из каталогов, вычисление которых, согласно принципу информационной неравноценности, подробно представлено ранее [7].

Взаимодействие цифрового двойника, изображенного в виде узла нейронной сети, рассмотренной в двух версиях, с конечными пользователями выполняется по следующей схеме (рис. 3).

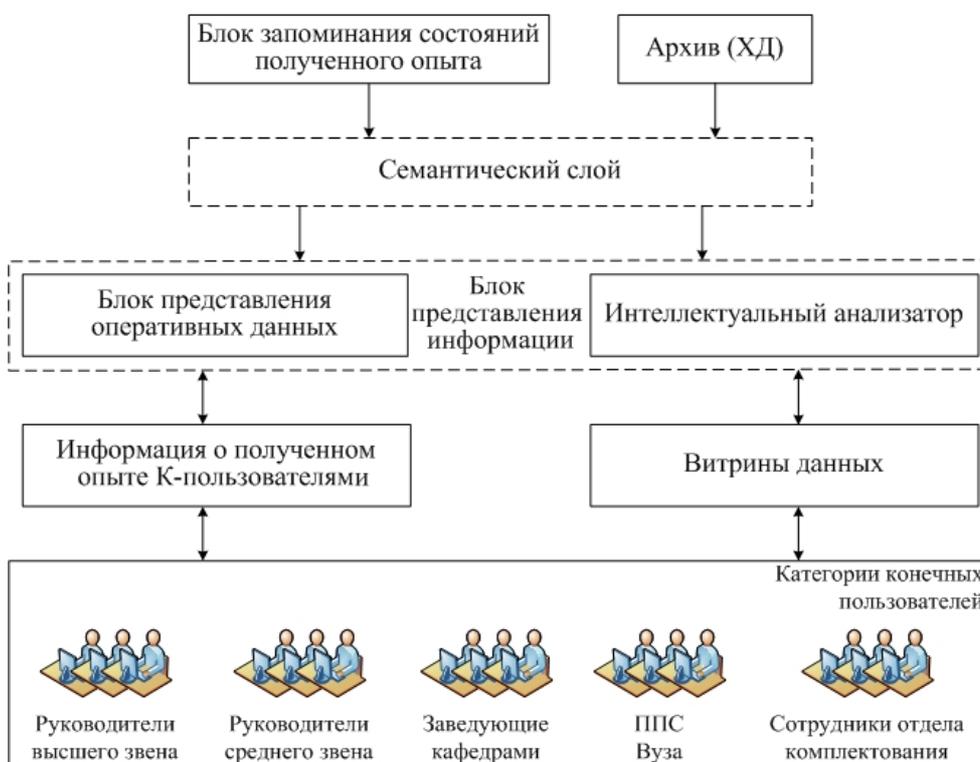


Рис. 3. Схема взаимодействия цифрового двойника с конечным пользователем
Fig. 3. Scheme of interaction of the digital twin with end user

Значения рейтингов, вычисленные в результате работы нейрона, поступают в блок запоминания состояний полученного опыта, из которого вместе с полученными ранее данными, хранящимися в архиве данных, переходят в блок представления информации через семантический слой. Блок представления информации предназначен для анализа полученных данных и формирования ранжированного списка рейтингов изданий, предлагаемых издательствами к покупке, которые, проходя через витрины данных, предоставляются пользователям.

Таким образом, схема нейронной сети, представленная в двух вариантах, позволяет реалистично продемонстрировать вычисление общих и общих взвешенных рейтингов изданий, представленных в каталогах издательств. Эти показатели применяются при определении целевых функций задачи оптимизации заказа литературы, которые требуют достижения наиболее полного соответствия объективным информационным потребностям сотрудников университета, получе-

ния рекордно возможной номенклатуры, а также приобретения предельного количества экземпляров заказываемых изданий.

Заключение

Построенные модели нейронных сетей, реализующие цифровой двойник и позволяющие определять значимость литературы, предлагаемой к приобретению, планируется рассматривать в качестве основных в процессе реализации интеллектуальной системы формирования заказа литературы, обладающего оптимальными характеристиками.

При этом предусматривается применение алгоритма обучения с помощью преподавателя, где входной информацией является обучающий спектр данных, на базе которых нейронная сеть распознает зависимости и правильно реагирует на поступающий тестовый набор данных.

Так, в процессе обучения знания учителя будут передаваться в сеть в максимально полном объеме. Как только сеть будет обучена, учителя можно отключить, что позволит нейронной сети работать самостоятельно.

Функциональные возможности разработанных абстрактных моделей нейронных сетей могут быть расширены с целью учета рейтинговых, качественных (по тематике публикаций), количественных (по наименованиям и видам изданий, стоимости заказа с доставкой и др.) показателей, а также определения количества экземпляров заказываемых изданий [2–6].

Список литературы

1. Абильдина А.Д., Амиров А.Ж., Баймульдин М.К. Концепция автоматизации управления в отраслях образования: проблемы, особенности // Молодой ученый. 2016. № 10 (114). С. 29–31.
2. Головкин Ю.Б., Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Автоматизация заказа литературы для вуза по показателям содержательной значимости изданий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 125–131. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-125-131
3. Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Об использовании рейтингов изданий при заказе литературы для вуза // Информатизация образования и науки. 2018. № 4 (40). С. 177–185.
4. Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Разработка системы заказа литературы для вуза на основе показателей содержательной значимости и подтверждение эффективности ее применения // Вестник СибГУТИ. 2018. № 2. С. 22–31.
5. Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Формирование заказа литературы для библиотеки вуза на основе локальных рейтингов изданий как задача исследования операций // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 5 (40). С. 176–187.
6. Миронов В.В., Ярцев Р.А., Кромина Л.А. Применение общих рейтингов заказываемых изданий при формировании оптимального варианта заказа литературы для вуза // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2012. Т. 10, № 4. С. 5–12.
7. Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Об учете авторской значимости литературных ссылок при оптимизации заказа книжных изданий для библиотеки вуза // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 6. С. 373–380. DOI: 10.17587/it.25.373-380
8. Кромина Л.А., Ярцев Р.А. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений при заказе литературы для вуза на основе ранжирования изданий по уровню потребности. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2015. 126 с.
9. Воронов И.В., Политов Е.А., Ефременко В.М. Обзор типов искусственных нейронных сетей и методов их обучения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 3 (61). С. 38–42.
10. Фаустова К.И. Нейронные сети: применение сегодня и перспективы развития // Территория науки. 2017. № 4. С. 83–87.
11. Осипов А.Н., Эттингер А.П. Индекс Хирша: определение, расчет, использование // Вестник Российского государственного медицинского университета. 2013. № 1. С. 75–77.
12. Цыганов А.В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости // Управление большими системами. 2013. Вып. 44. С. 248–261.
13. Штовба С.Д., Штовба Е.В. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого // Управление большими системами. 2013. Вып. 44. С. 262–278.

14. Беляева Л.Н., Шубина Н.Л. Научная статья как объект экспертной оценки // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2014. № 172. С. 5–12.
15. Данелян Т.Я. Формальные методы экспертных оценок // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2015. № 1. С. 183–187.

References

1. Abildina A.D., Amirov A.J., Baymuldin M.K. [The concept of automation of management in the education sector: problems, peculiarities]. *Young Scientist*. 2016;10(114):29–31. (In Russ.)
2. Golovkin Yu.B., Kromina L.A., Yartsev R.A. Automated ordering of academic books for higher education institute on indicators of importance of publication content. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Journal of Instrument engineering*. 2017;60(2):125–132. (In Russ.) DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-125-131
3. Kromina L.A., Yartsev R.A. About the use of ratings publications at the order of the literature for the university. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki*. 2018;4(40):177–185. (In Russ.)
4. Kromina L.A., Yartsev R.A. Development of a book order system for Universities on the basis of content significance indicators and its application effectiveness conformation. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2018;(2):22–31. (In Russ.)
5. Kromina L.A., Yartsev R.A. [Formation of literature order for university library on the basis of local ratings of editions as a task of operations research]. *Vestnik UGATU*. 2010;14(5(40)):176–187. (In Russ.)
6. Mironov V.V., Yartsev R.A., Kromina L.A. Application of the general ratings of the ordered publications in the formation of an optimum variant of the order of literature for high school. *Vestnik Novosibirsk state university. Series: Information technologies*. 2012;10(4):5–12. (In Russ.)
7. Kromina L.A., Yartsev R.A. On the account of the author's significance of literary references by optimization of the order of book editions for the university library. *Information technologies = Informacionnye tehnologii*. 2019;25(6):373–380. (In Russ.) DOI: 10.17587/it.25.373-380
8. Kromina L.A., Yartsev R.A. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri zakaze literatury dlya vuzov na osnove ranzhirovaniya izdaniy po urovnyu potrebnosti* [Automated information system of decision support for ordering literature for higher education institution based on ranking of publications by level of need: monograph]. Ufa: Ufa St. Aviation Technical Univ. Publ.; 2015. 126 p. (In Russ.)
9. Voronov I.V., Politov E.A., Efremenko V.M. [Review of types of artificial neural networks and methods of their training]. *Bulletin of the Kuzbass state technical university*. 2007;3(61):38–42. (In Russ.)
10. Faustova K.I. [Neural networks: application today and prospects for development]. *Territoriya nauki*. 2017;(4):83–87. (In Russ.)
11. Osipov A.N., Oettinger A.P. H-index: definition, calculation, use. *Bulletin of Russian state medical university*. 2013;(1):75–77. (In Russ.)
12. Tsiganov A.V. Brief review of main scientometric indices based on citations. *Large-Scale Systems Control*. 2013;44:248–261. (In Russ.)
13. Shtovba S.D., Shtovba E.V. A survey on scientometric indicators for assessment of researcher's publication activity. *Large-Scale Systems Control*. 2013;44:262–278. (In Russ.)
14. Beliaeva L.N., Shubina N.L. Scientific paper as a peer review matter. *Izvestia: Herzen university journal of humanities & sciences*. 2014;(172):5–12. (In Russ.)
15. Danelyan T.Ya. Formal methods of expert estimations. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO*. 2015;(1):183–187. (In Russ.)

Информация об авторе

Кромина Людмила Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; luyda-kr@yandex.ru.

Information about the author

Lyudmila A. Kromina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; luyda-kr@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 22.03.2023

The article was submitted 22.03.2023

ПЕРЕОБУЧЕНИЕ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В.А. Парасич¹, pva16@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3593-2345>
И.В. Парасич¹, parasichiv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1965-8737>
Г.И. Волович², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>
С.Г. Некрасов¹, nekrasovsg@susu.ru
А.В. Парасич³, parasichav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2728-0893>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

³ ООО «ТРИДИВИ», Челябинск, Россия

Аннотация. Переобучение является одним из важнейших факторов, влияющих на качество работы алгоритмов машинного обучения. При решении задач машинного обучения важно уметь эффективно решать проблему переобучения. **Цель исследования.** Цель данной статьи – изучить проблему переобучения в задачах машинного обучения. В статье рассматриваются эффективные приёмы обучения, направленные на предотвращение переобучения. **Материалы и методы.** Основное внимание в статье уделяется различным важным с практической точки зрения нестандартным вопросам, связанным с переобучением. Рассматриваются различные причины переобучения, его последствия и методы борьбы с переобучением. Изучается зависимость переобучения и обобщающей способности от качества признаков и свойств обучающей выборки. Особое внимание уделяется особенностям обучения и формирования обучающей выборки в многомерных пространствах признаков. Рассматривается вопрос правильного формирования обучающей выборки и правильного добавления данных в обучающую выборку с точки зрения предотвращения переобучения, а также влияние неправильного распределения целевой переменной на переобучение. Объясняется, почему методы добавления в обучающую выборку некорректных данных, такие как MixUp и CutMix, могут повысить качество обучения. Рассматривается проблема уверенности алгоритма в своих предсказаниях, а также проблема overconfidence алгоритма в неправильных предсказаниях, характерная в том числе для ChatGPT. Рассматривается проблема оценки качества работы алгоритма. Показано, почему нормализация может помочь избежать переобучения. **Результаты.** Предложен алгоритм обучения деревьев решений Random Samples Mix-Up, предназначенный для борьбы с переобучением, который позволяет улучшить качество обучения деревьев решений. Проводится сравнительный анализ качества моделей до и после применения данного метода борьбы с переобучением. Эксперименты на реальных данных подтверждают эффективность данного метода. **Заключение.** Результаты исследования могут быть полезны при разработке новых алгоритмов машинного обучения и повышении эффективности существующих. Результаты исследования могут быть полезны для разработчиков алгоритмов машинного обучения и специалистов в области искусственного интеллекта.

Ключевые слова: машинное обучение, переобучение, глубокое обучение, деревья решений, обучение метриком, обучающая выборка

Для цитирования: Переобучение в машинном обучении: проблемы и решения / В.А. Парасич, И.В. Парасич, Г.И. Волович и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 18–27. DOI: 10.14529/ctcr240202

OVERFITTING IN MACHINE LEARNING: PROBLEMS AND SOLUTIONS

V.A. Parasich¹, pva16@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3593-2345>
I.V. Parasich¹, parasichiv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1965-8737>
G.I. Volovich², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>
S.G. Nekrasov¹, nekrasovsg@susu.ru
A.V. Parasich³, parasichav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2728-0893>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

³ LLC TRIDIVI, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Overfitting is one of the most important factors affecting the performance of machine learning algorithms. When solving machine learning problems, it is important to be able to effectively solve the problem of overfitting. **The research objective.** The purpose of this article is to study the problem of overfitting in machine learning tasks. The article discusses effective learning methods aimed at preventing overfitting. **Material and methods.** The focus of the article is on various non-standard issues related to overfitting that are important from a practical point of view. Various causes of overfitting, its consequences and methods of combating overfitting are considered. The dependence of overfitting and generalizing ability on the quality of features and properties of the training set is studied. Particular attention is paid to the features of training and the formation of a training sample in multidimensional feature spaces. The question of the correct formation of the training set and the correct addition of data to the training set from the point of view of overfitting prevention, as well as the impact of incorrect distribution of the target variable on overfitting, is considered. It is explained why the methods of adding incorrect data to the training set, such as MixUp and CutMix, can improve the quality of training. The problem of the algorithm's confidence in its predictions is considered, as well as the problem of algorithm overconfidence in incorrect predictions, which is also typical for ChatGPT. The problem of assessing the quality of the algorithm is considered. It is shown why normalization can help avoid overfitting. **Results.** An algorithm for training decision trees Random Samples Mix-Up is proposed to combat overfitting, which improves the quality of training decision trees. A comparative analysis of the quality of models before and after the application of this method of combating overfitting is carried out. Experiments on real data confirm effectiveness of this method. **Conclusion.** The results of the study can be useful in developing new machine learning algorithms and improving the efficiency of existing ones. The results of the study can be useful for developers of machine learning algorithms and specialists in the field of artificial intelligence.

Keywords: machine learning, overfitting, deep learning, decision trees, metric learning, training set

For citation: Parasich V.A., Parasich I.V., Volovich G.I., Nekrasov S.G., Parasich A.V. Overfitting in machine learning: problems and solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):18–27. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240202

Введение

Переобучение – это широко распространённая проблема в машинном обучении, которая сильно влияет на качество обучения. Основной теорией машинного обучения (и переобучения) на сегодняшний день является теория Вапника – Червоненкиса [1]. Одно из основных положений этой теории – обобщающая способность алгоритма зависит от сложности модели. Рассмотрим, от чего ещё может зависеть переобучение.

Почему у алгоритмов машинного обучения возникает способность правильно работать на данных, которых нет в обучающей выборке, и почему эти алгоритмы оказываются способными к обобщению на те данные, которые не участвовали в процессе обучения и про которые алгоритм ничего не знает? По сути, обобщающая способность является следствием того, что похожие объекты имеют похожие значения признаков. Иначе объекты одного класса могут оказаться произвольно разбросанными по признаковому пространству и обучение будет крайне затруднено. Похожей концепцией является требование низкого *variance* модели в *bias-variance tradeoff* [2].

Поэтому рассмотрим далее утверждение о том, что обобщающая способность зависит от устойчивости и стабильности признаков, входящих в модель.

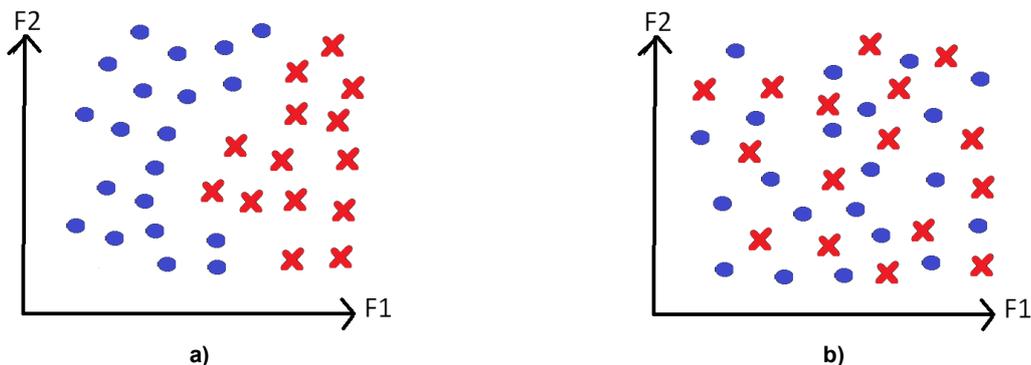


Рис. 1. Пример пространства признаков в случае устойчивых (a) и неустойчивых (b) признаков
Fig. 1. An example of a feature space in the case of stable (a) and unstable (b) features

Представим для наглядности двумерное пространство признаков. Если признаки объектов не будут обладать свойством стабильности, то объекты окажутся раскиданными вперемешку по этому признаковому пространству (рис. 1) и обобщение будет, по сути, невозможно, а возможно будет только заучивание конкретных обучающих примеров. Похожей концепцией является гипотеза компактности [3, 4].

1. Эксперимент

Самыми неустойчивыми и нестабильными из вычислительных функций с точки зрения variance являются криптографические хэш-функции [5] – они построены таким образом, чтобы малому изменению входного значения функции соответствовало большое изменение выходного значения (для такой функции сложно подобрать обратную функцию). Поэтому проведём следующий эксперимент – заменим значения всех признаков модели на значения криптографической хэш-функции от этих признаков. Для эксперимента был выбран стандартный набор данных «Ирисы Фишера» [6]. В этом наборе данных 150 объектов, для каждого известны 4 числовых признака – petal_length, petal_width, sepal_length, sepal_width. Прохэшируем эти признаки (использовался алгоритм sha256 [7]) и обучим на них SVM (SVC) [8]. В результате признаки похожих объектов перестали быть похожими, а это ключевое условие для того, чтобы алгоритм мог обобщаться на данные, которых нет в обучающей выборке. В эксперименте 105 объектов включены в обучающую выборку, оставшиеся 45 – в тестовую.

Сравним результаты обучения на исходных и на модифицированных признаках. При обучении на исходных признаках качество на обучающей выборке составило 98,1 %, на тестовой – 97,8 % (табл. 1). При обучении на хэшированных признаках качество на обучающей выборке составило 100 %, на тестовой – 26,7 %, что примерно соответствует качеству случайного угадывания. То есть при обучении на хэшированных признаках произошло сильное переобучение из-за того, что нарушилось свойство стабильности признаков (признаки похожих объектов перестали быть похожими).

Таблица 1

Качество классификации SVC на датасете Fisher's Iris
в зависимости от используемых признаков

Table 1

The quality of SVC classification on the Fisher's Iris dataset
depending on the features used

	Обучение на исходных признаках	Обучение на криптографических хэш-функциях от признаков
Качество на обучающей выборке, %	98,1	100
Качество на тестовой выборке, %	97,8	26,7

Напрашивающийся отсюда вывод: в задачах машинного обучения следует использовать устойчивые признаки с низким *variance* (то есть те признаки, которые максимально не похожи на криптографические хэш-функции).

Примером неустойчивой функции является деление со знаменателем, близким к нулю. Также неустойчивыми являются операции взятия максимума и минимума, лучше вместо них использовать перцентили. Примером неустойчивого преобразования из области геометрии является восстановление прямой по двум близко лежащим точкам. В этом случае при небольших изменениях в положении точек восстановленная по ним прямая будет изменяться очень сильно.

Другой проблемой являются признаки с очень редкими значениями. Например, если в задаче классификации для некоторого значения V некоторого категориального признака F в обучающей выборке существует только один пример x_i с таким значением признака $F(x) = V$ (при этом целевая переменная для объекта x_i принимает значение $C(x_i)$), то алгоритм может выучить тривиальную закономерность $(F(x) = V) \Rightarrow (y(x) = C(x_i))$. В данном случае признак F не является устойчивым с точки зрения *variance*.

2. Проблема уверенности (confidence) алгоритма в своих предсказаниях

Часто при использовании моделей машинного обучения возникает необходимость определить уверенность модели в своих предсказаниях. Эту информацию можно использовать, например, для того, чтобы отбрасывать те предсказания, в которых модель не уверена, а учитывать только те, в которых она уверена.

Однако здесь стоит учитывать следующее. Модель, полученная с помощью машинного обучения, как правило, хуже всего работает на тех типах данных, которых не было в обучающей выборке. А раз этих данных не было в обучающей выборке, то у модели при обучении не было возможности правильно настроить выдачу уверенности для таких данных. Поэтому часто возникает проблема излишней уверенности (*overconfidence*) модели в неправильных предсказаниях. На практике определение уверенности алгоритма в его предсказаниях обычно работает также достаточно плохо.

Проблема *overconfidence* актуальна [9] и для современных больших языковых моделей (LLM), таких как GPT-3 [10] и ChatGPT. ChatGPT, например, иногда пишет правдоподобно звучащие, но неправильные или бессмысленные ответы. При этом сама ChatGPT не может определить, является её ответ правильным или нет, что сильно осложняет её использование в реальных задачах.

3. Проблема оценки качества работы алгоритма

Причём всё то же самое (что и в случае с уверенностью модели в своих предсказаниях) можно сказать и про измерение качества работы алгоритма на тестовой выборке. Алгоритм хуже всего работает на тех данных, которых не было или было мало в обучающей выборке. А если их не было в обучающей выборке и тестовая выборка взята из того же источника, что и обучающая (например получена с помощью классического случайного разделения одной выборки на две части), то, значит, и в тестовой выборке таких данных не было или было мало.

Это касается в том числе и обучения деревьев решений. Самые проблемные с точки зрения вершины – это те вершины, в которые при обучении попало мало данных (в таких вершинах высок риск переобучения). Но если тестовая выборка взята из того же распределения, что и обучающая, то на этапе тестирования в эти вершины попадёт ещё меньше данных, чем на этапе обучения (так как обучающая выборка обычно в несколько раз больше тестовой). Таким образом, метрики качества работы этих вершин будут ещё более неточными, чем ответы в этих вершинах. Можно бороться с этим с помощью того, что делать тестовую выборку в несколько раз больше обучающей и получать более надёжные оценки качества работы, а потом проводить обучение на полной обучающей выборке, используя подобранные таким образом гиперпараметры. Но тогда гиперпараметры, подобранные при обучении на такой уменьшенной обучающей выборке, могут быть далеки от гиперпараметров, оптимальных для обучения на полноразмерной обучающей выборке.

Поэтому рекомендуется тестировать качество модели не только на тестовых выборках, полученных с помощью случайного *train_test_split* некоторого датасета, но также тестировать *Cross-dataset Generalization*, то есть тестировать качество в том числе на отдельных датасетах, частей которых не было в обучении.

4. Особенности обучения в высокоразмерных пространствах признаков

Чаще всего в задачах машинного обучения приходится иметь дело с пространствами признаков высокой размерности. При использовании табличных данных у каждого элемента выборки могут быть десятки или сотни признаков. Нейронные сети, применяющиеся в задачах обработки изображений, имеют миллионы параметров, и если использовать число их возможных внутренних состояний в качестве размерности пространства признаков, то и вовсе получится несколько миллионов измерений.

Главной особенностью таких пространств является то, что даже при использовании больших обучающих выборок почти всё пространство окажется пустым и не будет заполнено никакими данными. Если мы возьмём пространство размерности 100 и будем рассматривать только его углы (каждый из признаков может иметь по два возможных значения), то получится, что пространство состоит из 2^{100} точек, что составляет величину порядка 10^{30} . Обучающие выборки, как правило, состоят в лучшем случае из нескольких миллионов элементов. Если же признаков будет не 100, а 1000, то всё становится ещё хуже.

Таким образом, результат работы обученного алгоритма в большинстве точек пространства будет или плохо обусловлен, или вообще являться величиной, зависящей в основном от случайных факторов (рис. 2), потому что в окрестности этих точек нет никаких данных. Также может наблюдаться сильное изменение качества работы алгоритма в ходе обучения, или при небольшом изменении гиперпараметров, или при добавлении небольшого количества данных.

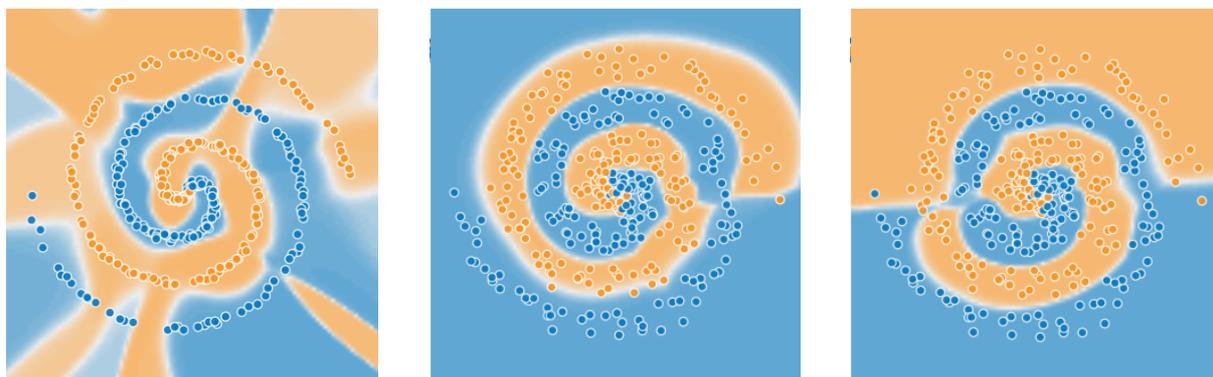


Рис. 2. Примеры разделяющей поверхности обученного алгоритма. В незаполненных пространствах признаков ответ алгоритма во многом зависит от случайных факторов. В многомерных признаковых пространствах таких незаполненных областей будет гораздо больше

Fig. 2. Examples of the separating surface of the trained algorithm. In unfilled areas of the feature space, the algorithm's response largely depends on random factors. In multidimensional feature spaces, there will be much more such unfilled areas

Один из возможных методов решения данной проблемы – заполнить пустующие области, каким-то образом интерполируя (модифицируя) данные, уже имеющиеся в обучающей выборке. Для задач обработки изображений существуют такие методы, как *MixUp* [11] и *CutMix* [12]. Эти методы позволяют повысить качество обучения. При этом полученные изображения могут выглядеть некорректно (то есть в реальности таких изображений никогда не возникает), например, может получиться кошка с головой собаки. Однако лучше настроить ответ алгоритма в этих областях на основании полукорректных данных, чем оставить его полностью случайным. Другим возможным методом для заполнения пустых областей пространства признаков является *Pseudo-Labeling* [13].

5. Влияние неправильного распределения целевой переменной в обучающей выборке на переобучение

Что такое ошибка на тестовой выборке? Это разница между распределением ответов решающего правила и распределением тестовой выборки в точках, соответствующих элементам тестовой выборки. Однако распределение тестовой выборки не обязательно в точности отражает распределение генеральной совокупности. Некоторые данные в тестовой выборке могут отсутствовать, также может иметь место неправильный баланс классов относительно генеральной сово-

купности (во всей выборке либо на определённом участке пространства признаков). То есть может существовать разница в распределениях обучающей и тестовой выборок. Таким образом, ошибка на тестовой выборке состоит из двух слагаемых: разница распределения ответов алгоритма и генеральной совокупности и разница распределения генеральной совокупности и распределения тестовой выборки.

В самом простом случае в тестовой выборке могут быть неправильно сбалансированы классы относительно генеральной совокупности, причём в обучающей выборке они могут быть сбалансированы более правильно, чем в тестовой. В таком случае, подстраивая баланс ответов под баланс тестовой выборки, мы улучшаем качество на тестовой выборке, но ухудшаем качество на генеральной совокупности. При этом на самом деле не происходит повышения обобщающей способности алгоритма, хотя качество на тестовой выборке растёт. Также не является настоящим переобучением обратный случай, когда мы знаем, что в обучающей выборке распределение классов более правильное, чем в тестовой, и двигаем баланс в сторону от тестовой выборки к обучающей (хотя на графиках обучения это будет выглядеть как переобучение – ошибка на обучающей выборке будет уменьшаться, а на тестовой – увеличиваться). Поэтому качество работы алгоритма на тестовой выборке нельзя считать абсолютно точной мерой качества работы алгоритма и его обобщающей способности. Поэтому для повышения надёжности измерения качества рекомендуется применять различные методы кросс-валидации, в том числе *k-Fold Cross-Validation* [14], а также тестировать *Cross-Dataset Generalization*.

Для простоты дальнейших рассуждений будем считать, что у нас есть тестовая выборка, точно отражающая генеральную совокупность (хотя в большинстве случаев это недостижимо).

Как говорилось выше, ошибка на тестовой выборке – это разница между распределением ответов модели и распределением тестовой выборки в точках, соответствующих элементам тестовой выборки. Поэтому причиной переобучения может быть не только излишняя сложность модели или нехватка обучающих данных, но и искривление распределения (неправильное распределение) целевой переменной в обучающей выборке (или в определённых участках признакового пространства в обучающей выборке) относительно тестовой выборки (потому что распределение ответов алгоритма, как правило, отражает распределение целевой переменной в обучающей выборке).

Такое искривление может возникнуть, например, из-за недосэмплирования (рис. 3). Из-за особенностей сбора обучающей выборки в некоторой подобласти пространства признаков может не оказаться данных определённого класса, из-за чего обученная модель будет возвращать в этой области пространства признаков неправильный ответ.

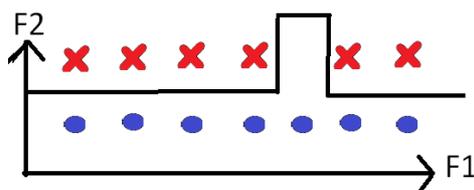


Рис. 3. Пример заучивания ложной закономерности из-за недосэмплирования
Fig. 3. An example of learning a false pattern due to undersampling

Также может возникнуть ситуация пересэмплирования – однотипные (или одинаковые) данные включены в выборку слишком большое число раз, из-за чего сильно искажается распределение в их окрестности. Всё это может негативным образом сказаться на качестве обучения. Примером данной проблемы являются покупки оптовиков в задачах, связанных с предсказанием спроса.

Одним из самых эффективных приёмов улучшения качества обучения является добавление в обучающую выборку сложных обучающих примеров (похожих на те, которые распознаются плохо). Однако при таком добавлении есть большой риск создать искривление распределения в той области, в которую добавляются данные, особенно если мы добавляем примеры только одного класса. Это может привести к тому, что ухудшится качество работы на объектах других

классов. При этом может показаться, что это происходит из-за ограниченной ёмкости модели (новые данные «не входят» в модель и поэтому улучшить качество работы на них нельзя). Однако на самом деле стоит просто исправить искривление распределения. Поэтому при добавлении данных в обучающую выборку надо следить за тем, чтобы не создать дополнительных искривлений распределения, при этом не рекомендуется добавлять примеры только одного класса.

При этом в датасетах часто распределение целевой переменной искривлено по тем или иным параметрам. Достаточно сложно обеспечить, чтобы распределение было изначально правильным по всем возможным параметрам. Выравнивание распределения может стать эффективным приёмом повышения качества.

Факторы, влияющие на наблюдаемые признаки объекта, можно разделить на внутренние и внешние (например, условия освещения в задачах обработки изображений). Таким образом, один и тот же объект может оказаться в разных точках пространства признаков в зависимости от внешних условий (разброс этих точек будет зависеть от устойчивости признаков к изменению внешних условий).

При этом, если при изменении внешних условий (например освещения) данные попадают в существенно разные участки пространства признаков, нам надо обеспечить, чтобы в каждом из этих участков пространства признаков распределение целевой переменной было правильным (не возникало искривления распределений). Например, если в задаче классификации собак и кошек (в задаче отличить собаку от кошки) окажется, что в обучающей выборке в условиях очень яркого освещения есть только изображения собак (или их в несколько раз больше, чем изображений кошек), то алгоритм выучит соответствующую ложную закономерность.

Одним из возможных решений данной проблемы может быть нормализация. В случае с разной освещённостью мы можем привести все изображения к одинаковой средней яркости. Тогда данные будут не так сильно разбросаны по разным участкам пространства признаков и будет проще обеспечить правильное распределение целевой переменной во всех случаях (не надо будет отдельно обеспечивать, чтобы было правильное распределение классов и при сильном, и при слабом освещении).

6. Random Samples Mix-Up

Одна из основных причин переобучения при обучении деревьев решений [15] – при обучении (выборе параметров) некоторых вершин используется малое число обучающих примеров. Так происходит потому, что при обучении каждой вершины множество обучающих данных делится на две части, соответствующие левому и правому сыновьям данной вершины, и далее левый и правый сыновья вершины обучаются на уменьшенных подмножествах оригинального множества данных. Таким образом, при обучении нижних уровней дерева для обучения конкретной вершины используется гораздо меньше данных, чем было в исходном множестве данных или при обучении вершин на верхних уровнях дерева. В лучшем случае при полностью равномерном разделении выборки на две части в каждой из вершин минимальное число примеров для обучения вершины на уровне D будет равно $N/2^D$, где N – размер обучающей выборки, D – глубина вершины. Однако в реальности разделение выборки в каждой из вершин происходит неравномерно, поэтому будут вершины, в которых попадёт ещё меньше данных.

Естественное решение этой проблемы – увеличить число данных, которые используются при обучении вершины. Рассмотрим способы сделать это без расширения обучающей выборки. Мы можем использовать при обучении вершины те обучающие примеры, которые должны были использоваться при обучении других вершин. Чтобы не выделять дополнительную память, мы можем в процессе обучения каждой из вершин для каждого отдельного обучающего примера с некоторой вероятностью p перераспределять его не в ту вершину, в которую он должен был попасть. Легко убедиться, что при такой процедуре у тех вершин, в которых было много данных, будет отобрано много данных, а у тех вершин, в которых было мало данных, будет отобрано мало данных (но в них будет добавлено много данных). То есть произойдёт перераспределение обучающей выборки в пользу тех вершин, в которых было мало данных.

Возможное обобщение данного метода – перемешивать данные между вершинами не случайно, а в зависимости от значений признаков объектов. То есть таким образом, чтобы в другую

вершину попадали те объекты, которые имеют более высокую вероятность попасть в эту вершину, если на значения их признаков повлияет шум (или это будет объект, похожий на данный, но с немного другими значениями признаков). Для этого на этапе выбора признака в вершину будем случайно модифицировать значения данного признака для некоторых объектов, вследствие чего часть объектов обучающей выборки в процессе обучения попадёт не в свою вершину.

В наших экспериментах этот метод сам по себе не дал прироста в качестве обучения (хотя это может быть не так в других задачах). Однако если скомбинировать его с базовой версией метода (то есть для половины объектов обучающей выборки использовать базовую схему с полностью случайным перемешиванием объектов, а для другой половины объектов – случайную модификацию признаков), то получится добиться улучшения качества обучения. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2
Качество классификации на тестовой выборке при разных значениях вероятности p_m изменения вершины в дереве для обучающего примера

Table 2

The quality of classification on the test sample for different values of the probability p_m of changing the node in the tree for training sample

Вероятность изменения вершины для обучающего примера	$p_m = 0$	$p_m = 0,1$	$p_m = 0,04$	$p_m = 0,02$	$p_m = 0,01$	$p_m = 0,005$
Качество классификации случайное перемешивание примеров, %	67,66	68,24	68,39	68,22	67,96	67,82
Качество классификации, случайная модификация признаков, %	67,66	68,15	68,21	68,27	67,85	67,76
Качество классификации, комбинированный алгоритм, %	67,66	68,55	68,78	68,47	68,03	67,95

Выводы

Сформулируем кратко основные выводы.

– Обобщающая способность алгоритма зависит от устойчивости признаков. Похожие объекты должны иметь похожие значения признаков, в противном случае возникает переобучение. Поэтому при решении задач машинного обучения следует использовать устойчивые признаки.

– Переобучение также может быть следствием неправильного распределения целевой переменной в пространстве признаков.

– При добавлении данных в обучающую выборку важно не создавать искривление распределения целевой переменной в пространстве признаков.

– Наличие в выборке большого количества однотипных данных (или данных из одного источника) может привести к искривлению распределения целевой переменной в пространстве признаков и, следовательно, к ухудшению качества обучения.

– Устранение неправильного распределения целевой переменной в обучающей выборке может привести к повышению качества.

– В многомерных пространствах признаков многие области не заполнены никакими объектами обучающей выборки, поэтому ответ обученного алгоритма в таких областях будет плохо обусловленным или случайным. Поэтому имеет смысл применять аугментации, производящие некорректные изображения (например, MixUp или CutMix), чтобы хоть как-то заполнить пустующие области и сделать ответ алгоритма в них менее случайным.

Список литературы

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. Статистические проблемы обучения. М.: Наука, 1974. 416 с.
2. Reconciling modern machine-learning practice and the classical bias–variance trade-off / M. Belkin, D. Hsu, S. Ma, S. Mandal // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, no. 32. P. 15849–15854. DOI: 10.1073/pnas.1903070116
3. Аркадьев А.Г., Браверман Э.М. Обучение машины распознаванию образов. М.: Наука, 1964. 110 с.
4. Загоруйко Н.Г. Гипотезы компактности и λ -компактности в методах анализа данных // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 1998. Т. 1, № 1, С. 114–126.
5. Augot D., Finiasz M., Sendrier N. A fast provably secure cryptographic hash function // *Cryptology ePrint Archive*. 2003. No. 230. P. 3–4.
6. Fisher R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems // *Annals of eugenics*. 1936. Vol. 7, no. 2. P. 179–188. DOI: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x
7. Dang Q. Secure Hash Standard. Federal Inf. Process. Stds. (NIST FIPS), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2015. DOI: 10.6028/NIST.FIPS.180-4
8. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 448 с.
9. Xiao Y., Wang W.Y. On hallucination and predictive uncertainty in conditional language generation // *arXiv preprint arXiv:2103.15025*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.15025
10. Language models are few-shot learners / T. Brown et al. // *Advances in neural information processing systems*. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.
11. mixup: Beyond empirical risk minimization / H. Zhang, M. Cisse, Y.N. Dauphin, D. Lopez-Paz // *arXiv preprint arXiv:1710.09412*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1710.09412
12. Cutmix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features / S. Yun, D. Han, S.J. Oh et al. // *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. 2019. P. 6023–6032. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00612
13. Pseudo-labeling and confirmation bias in deep semi-supervised learning / E. Arazo, D. Ortego, P. Albert et al. // *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207304
14. The 'K' in K-fold Cross Validation / D. Anguita, L. Ghelardoni, A. Ghio et al. // *Conference: European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN)*. 2012. P. 441–446.
15. Magee J.F. Decision trees for decision making // *Harvard Business Review*. 1964. Vol. 42, no. 4. P. 126–138.

References

1. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. *Teoriya raspoznavaniya obrazov. Statisticheskie problemy obucheniya* [Theory of pattern recognition. Statistical learning problems]. Moscow: Nauka; 1974. 416 p. (In Russ.)
2. Belkin M., Hsu D., Ma S., Mandal S. Reconciling modern machine-learning practice and the classical bias–variance trade-off. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019;116(32):15849–15854. DOI: 10.1073/pnas.1903070116
3. Arcadiev A.G., Braverman E.M. *Obuchenie mashiny raspoznavaniyu obrazov* [Teaching a Machine to Pattern Recognition]. Moscow: Nauka; 1964. 110 p. (In Russ.)
4. Zagoruiko N.G. [Hypotheses of compactness and λ -compactness in methods of data analysis]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*. 1998;1(1):114–126. (In Russ.)
5. Augot D., Finiasz M., Sendrier N. A fast provably secure cryptographic hash function. *Cryptology ePrint Archive*. 2003;(230):3–4.
6. Fisher R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of eugenics*. 1936;7(2):179–188. DOI: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x
7. Dang Q. *Secure Hash Standard*. Federal Inf. Process. Stds. (NIST FIPS), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; 2015. DOI: 10.6028/NIST.FIPS.180-4
8. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimostey po empiricheskim dannym* [Recovery of dependences on empirical data]. Moscow: Nauka; 1979. 448 p. (In Russ.)

9. Xiao Y., Wang W.Y. On hallucination and predictive uncertainty in conditional language generation. *arXiv preprint arXiv:2103.15025*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.15025
10. Brown T. et al. Language models are few-shot learners. *Advances in neural information processing systems*. 2020;33:1877–1901.
11. Zhang H., Cisse M., Dauphin Y.N., Lopez-Paz D. mixup: Beyond empirical risk minimization. *arXiv preprint. arXiv:1710.09412*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1710.09412
12. Yun S., Han, D., Oh S.J., Chun S., Choe J., Yoo Y. Cutmix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features. In: *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. 2019. P. 6023–6032. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00612
13. Arazo E., Ortego D., Albert P., O'Connor N.E., McGuinness K. Pseudo-labeling and confirmation bias in deep semi-supervised learning. In: *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE*. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207304
14. Anguita D., Ghelardoni L., Ghio A., Oneto L., Ridella S. The 'K' in K-fold Cross Validation. In: *Conference: European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN)*. 2012. P. 441–446.
15. Magee J.F. Decision trees for decision making. *Harvard Business Review*. 1964;42(4):126–138.

Информация об авторах

Парасич Виктор Александрович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pva16@yandex.ru.

Парасич Ирина Васильевна, канд. техн. наук, доц. кафедры математического и компьютерного моделирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; parasichiv@mail.ru.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Парасич Андрей Викторович, инженер-программист, ООО «ТРИДИВИ», Челябинск, Россия; parasichav@yandex.ru.

Information about the authors

Victor A. Parasich, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pva16@yandex.ru.

Irina V. Parasich, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Mathematical and Computer Modeling, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; parasichiv@mail.ru.

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Andrey V. Parasich, Software engineer, LLC TRIDIVI, Chelyabinsk, Russia; parasichav@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 16.05.2023

The article was submitted 16.05.2023

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 004.82
DOI: 10.14529/ctcr240203

ПРОГНОЗНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ И МОДЕЛИ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА

В.Ю. Столбов, valeriy.stolbov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3259-8660>
Г.В. Нетбай, netbay.georgij@gmail.com

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. В статье приводится анализ оценки качества работы моделей управления тепловой сетью города. Результатами анализа является рекомендация по выбору оптимальной модели управления с точки зрения точности и ресурсов, необходимых для её обучения. Данная рекомендация позволит реализовать интеллектуальный модуль для системы поддержки принятия решений, который используется при реализации автоматизированной системы управления тепловой сетью города и позволяет более экономно с точки зрения расходования ресурсов обеспечивать поддержание требуемого температурного режима в многоквартирных домах потребителей. **Целью исследования** является выбор модели, которая позволит с большей точностью вычислять величину потерь в сети теплоснабжения города. Применение такой модели позволит прогнозировать поведение тепловой сети и в соответствии с этим выбирать управляющее воздействие. **Материалы и методы.** Анализируются линейная модель, как наиболее простая в обучении и показавшая высокую точность при прогнозировании работы сети в устоявшихся режимах, а также модель на основе деревьев решений, построенная при помощи метода градиентного бустинга. **Результаты.** Исследованы возможности модели на основе деревьев решений, обученной на основе статистических данных, предсказывать величину тепловых потерь в сети с учётом тепловой инерции системы и прогнозных значений температуры воздуха. Обосновано применение такой модели, показавшей хорошие результаты при исследовании. Приведены оценки точности прогнозирования для линейной модели, а также модели на основе деревьев решений. **Заключение.** Предложенные методы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы управления теплоснабжением.

Ключевые слова: управление городской тепловой сетью, математические модели, прогнозное управление, интеллектуальные системы управления

Для цитирования: Столбов В.Ю., Нетбай Г.В. Прогнозное управление системой теплоснабжения города с использованием линейной регрессии и модели градиентного бустинга // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 28–38. DOI: 10.14529/ctcr240203

Original article

DOI: 10.14529/ctcr240203

PREDICTIVE CONTROL OF THE CITY HEAT SUPPLY SYSTEM USING LINEAR REGRESSION AND GRADIENT BOOSTING MODEL

V.Yu. Stolbov, valeriy.stolbov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3259-8660>**G.V. Netbay**, netbay.georgij@gmail.com

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The paper analyzes the evaluation of the quality of performance of control models of the city heat network. The results of the analysis are a recommendation for choosing the optimal control model in terms of accuracy and resources required for its training. This recommendation will allow to realize an intellectual module for the decision support system. The intellectual module will be used in the realization of the automated control system of the heat network of the city and will allow more economically, in terms of resource consumption to ensure the maintenance of the required temperature regime in the apartment buildings of consumers. **Purpose of the research.** Selection of a model that will allow to calculate with greater accuracy the value of losses in the heat supply network of the city. Application of such a model will allow to predict the behavior of the heating network and, in accordance with this, to choose the control action. **Materials and methods.** Linear model, as the simplest in training, and showed high accuracy in predicting the network in established modes, as well as a model based on decision trees, built using the method of gradient boosting. **Results.** The capabilities of a decision tree-based model trained on the basis of statistical data to predict the value of heat losses in the network taking into account the thermal inertia of the system and predicted values of air temperature have been investigated. The application of such a model, which showed good results in the study, is justified. Performance estimates for the linear model as well as for the model based on decision trees are given. **Conclusion.** The proposed methods and models are tested on real data, which confirms the possibility of their use in the development of intelligent information system of heat supply management.

Keywords: urban heat network management, mathematical models, predictive control, intelligent control systems

For citation: Stolbov V.Yu., Netbay G.V. Predictive control of the city heat supply system using linear regression and gradient boosting model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):28–38. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240203

Введение

Задача теплоснабжающей организации (ТСО) заключается в обеспечении надлежащего теплоснабжения многоквартирных домов в соответствии с установленным температурным графиком [1]. Одним из ключевых аспектов при поставке теплоносителя потребителям является поддержание температуры поступающего тепла на определенном уровне. Допускается отклонение не более 5 % в меньшую сторону от указанной температуры.

Чтобы достичь оптимального регулирования режима работы котельной, ТСО может использовать различные методы и системы управления [2]. Например, в настоящее время для управления газовыми котельными внедряют системы, позволяющие в автоматизированном режиме поддерживать заданную температуру теплоносителя. Как правило, требуемую температуру задает оператор в ручном режиме посредством ввода нужных значений температуры в интерфейсе блока управления котлом. Использование таких систем в газовых котельных позволяет эффективно поддерживать заданную температуру теплоносителя на выходе из котельной путем автоматического регулирования работы котла и подачи топлива в соответствии с требуемыми параметрами [3]. Преимущества использования такой автоматики включают не только поддержание требуемого температурного режима, но и рациональный режим сжигания топлива. Это позволяет снизить затраты на энергоноситель (газ) и повысить экономическую и экологическую эффективность процесса поддержания необходимого теплового режима в жилых домах [4]. В результате исследований на котельной в городе Лысьва Пермского края было установлено, что экономия газа может достигать 12–15 % в год в зависимости от температуры окружающей среды в течение отопительного сезона [5].

Разработка и внедрение интеллектуальной системы управления температурой теплоносителя с учетом прогнозных значений температуры воздуха является логическим шагом в развитии автоматизации системы теплоснабжения [6, 7]. Эта интеллектуальная система должна анализировать прогнозную погоду и использовать эту информацию для оптимального управления температурой теплоносителя на выходе из котельной. Применение такой интеллектуальной системы позволит достичь экономии топлива в случаях быстрой смены погодных условий. Этот результат зависит от нескольких факторов, включая температуру окружающей среды в отопительный сезон и состояние теплосети.

Для реализации системы автоматизированного управления необходима модель тепловых потерь сети, а именно части, участвующей в транспортировке теплоносителя от котельной к домам [8]. Были апробированы несколько подходов к моделированию тепловых потерь: искусственные нейронные сети, линейная регрессия и модель на основе деревьев решений (XGBoost). В данной статье будут рассмотрены последние две.

В ходе эксплуатации и ремонта тепловой сети происходит изменение её свойств, а именно замена изоляции или её износ приводит к увеличению или уменьшению тепловых потерь. Оседание частиц грязи и ржавчины в трубопроводе приводит к изменению его свойств [9]. Изменения, происходящие в тепловой сети, приводят к снижению точности работы модели управления. Для компенсации этих изменений необходимо проводить обучение или дообучение модели. Модель, которая при равной с другими точности работы, может быть обучена за небольшое время, более удобна в эксплуатации.

Целью данной работы является анализ точности работы моделей потерь тепловой сети на основе линейной регрессии и деревьев решений для различных фрагментов тепловой сети города.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) анализ факторов, влияющих на процесс управления тепловой сетью города;
- 2) построение линейных моделей для тепловой сети города Чернушка;
- 3) построение модели на основе деревьев решений для того же фрагмента тепловой сети;
- 4) сравнение точности работы моделей.

В ходе анализа текущего подхода к управлению городской системой теплоснабжения было установлено, что на процесс управления тепловой сетью влияют такие факторы, как время достижения теплоносителем дома (для каждого дома своё), прогнозная температура окружающей среды в момент достижения теплоносителем дома и состояние тепловой сети: изоляция, состояние труб [10].

Литературный обзор показал, что для устоявшихся режимов, когда температуры окружающей среды и теплоносителя не меняются в течение нескольких часов, тепловые потери участка сети могут быть выражены числовым коэффициентом [11]. В таких ситуациях с задачей моделирования успешно может справиться линейная модель. Однако такой подход не учитывает переходные процессы, например тепловую инерцию подающего трубопровода сети, что может влиять на процесс управления в моменты резкого изменения температуры окружающей среды.

Постановка задачи управления

Задачу управления тепловой сетью можно определить следующим образом: требуется найти такую температуру теплоносителя в подающем трубопроводе котельной, чтобы в моменты достижения теплоносителем домов его температура была как можно ниже, но не менее 0,95х от определенной установленным температурным графиком [1].

Математическая постановка задачи прогнозного управления тепловой сетью с учетом факторов, влияющих на процесс, выглядит следующим образом.

Найти оптимальные значения температуры на выходе из котельной в заданные моменты времени:

$$T_{\text{вых}}^* (\tau_k), k = 1, 2, \dots$$

при которой

$$\sum_{i=1}^n \left(T_{\text{вх},i} (T_{\text{вых}}, \alpha, \tau_{\text{зап},i}) - \bar{T}_i (T_{\text{возд}}) \right)^2 \rightarrow \min, \forall \tau_k$$

при ограничениях:

$$T_{\text{вх}_i} \geq 0,95\bar{T}_i, \forall \tau_k;$$

$$T_{\text{вых}}^{\text{min}} \leq T_{\text{вых}} \leq T_{\text{вых}}^{\text{max}}, \forall \tau_k,$$

где k – выбранный момент времени, для которого производится расчёт; $T_{\text{вх}_i}$ – температура на входе в i -й дом; $T_{\text{вых}}$ – температура на выходе котельной; $T_{\text{возд}}$ – температура окружающего воздуха; α – параметр состояния тепловой сети (изоляция, архитектура); $\tau_{\text{зап}_i}$ – время достижения теплоносителем i -го дома (запаздывание).

Методы решения и анализ результатов

Для решения рассматриваемой задачи было предложено построить модель тепловой сети и при помощи неё, используя метод дихотомии, вычислять требуемую температуру на выходе котельной. Модель тепловых потерь сети позволит получать информацию о том, как ведёт себя тепловая сеть в ответ на заданные управляющие воздействия [12]. Использование метода дихотомии помогает решить задачу выбора оптимального управляющего воздействия – температуру теплоносителя в подающем патрубке котельной таким образом, чтобы его температура при достижении домов была в необходимых границах.

Моделирование тепловых потерь в сети производилось при помощи двух подходов: линейной регрессии и алгоритма XGBoost, который является развитием алгоритма деревьев решений [13, 14].

Работы проводились с использованием данных, предоставленных теплоснабжающей организацией, обслуживающей котельные в городах Лысьва и Чернушка Пермского края. Данные были получены с интеллектуальных приборов учёта тепла, установленных на подающем трубопроводе котельной и входах в многоквартирные дома в городе Чернушка. Сбор данных производился в период с 01.12.2019 г. по 01.03.2020 г. с помощью информационной системы «Аврора. ЖКХ» [2]. Выборка включает в себя такие параметры, как температура теплоносителя на выходе котельной, температура теплоносителя на входе в дома, температура окружающей среды.

Для обучения моделей были выбраны 10 многоквартирных домов, данные для которых содержат наименьшее количество пропусков и выбросов. Для каждого дома была построена отдельная модель. Обучение производилось на данных за период с 01.12.2019 г. по 01.01.2020 г. Для проверки точности работы моделей были использованы данные за период с 01.01.2020 г. по 01.01.2020 г. Построение линейных моделей производилось с учетом того факта, что в устоявшемся режиме тепловые потери сети могут быть выражены числовым коэффициентом. С использованием полученных моделей были вычислены температуры теплоносителя на входе в многоквартирные дома, которые затем были сравнены с реальными значениями из выборки. Оценки полученных результатов работы модели можно увидеть в табл. 1.

Таблица 1

Оценки качества работы линейной модели для вычисления температуры теплоносителя на входе в дома

Table 1

Assessment of the performance quality of a linear model for calculating the temperature of the coolant at the entrance to houses

№ дома в выборке данных	Среднее квадратичное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С	Максимальное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С
1	1,26	5,4
2	0,27	6,0
3	0,28	6,1
4	0,10	4,8
5	0,27	5,2
6	0,61	4,2
7	0,43	3,7
8	1,12	5,2
9	0,35	3,8
10	0,39	3,4

На рис. 1 приведено сравнение измеренной температуры теплоносителя в многоквартирном доме № 1 и вычисленной температуры с использованием линейной модели.

На рис. 2 приведено сравнение измеренной температуры теплоносителя в многоквартирном доме № 2 и вычисленной температуры с использованием линейной модели.

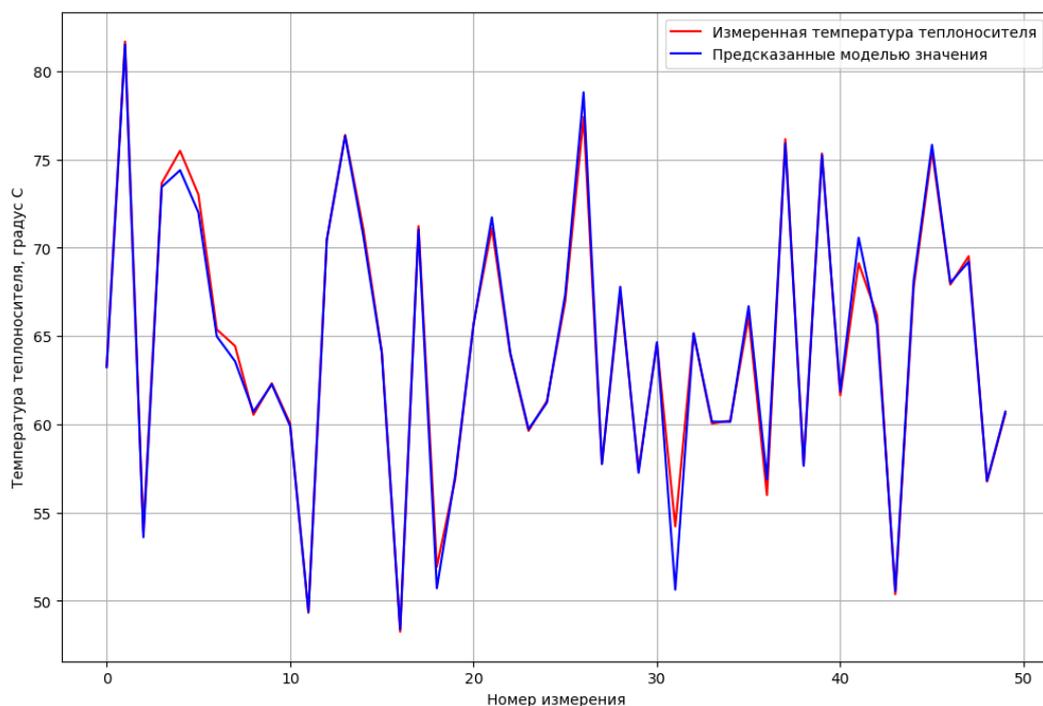


Рис. 1. Измеренные значения температуры теплоносителя и предсказанные линейной моделью для дома № 1 из выборки данных
Fig. 1. Measured values of coolant temperature and predicted by the linear model for house No. 1 from the data sample

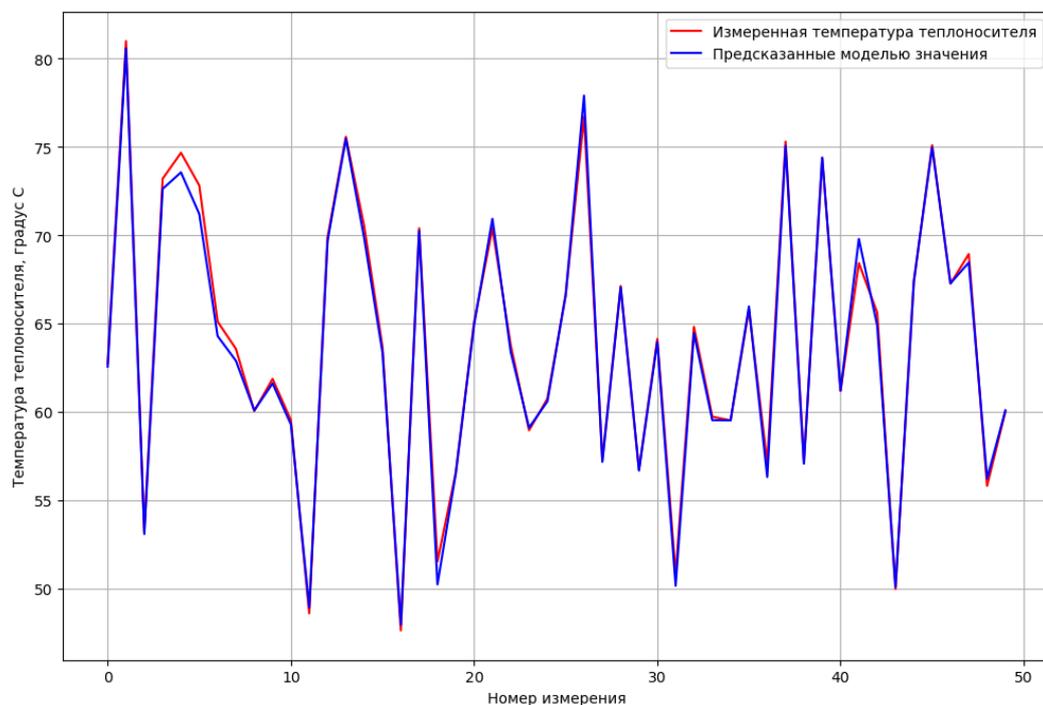


Рис. 2. Измеренные значения температуры теплоносителя и предсказанные линейной моделью для дома № 2 из выборки данных
Fig. 2. Measured values of coolant temperature and predicted by the linear model for house No. 2 from the data sample

В ходе разработки модели для анализа качества её работы были построены визуализации распределения температур на входе в дома от температуры в подающем трубопроводе котельной, а также график функции модели. Визуализацию для дома № 3 из выборки данных видно на рис. 3.

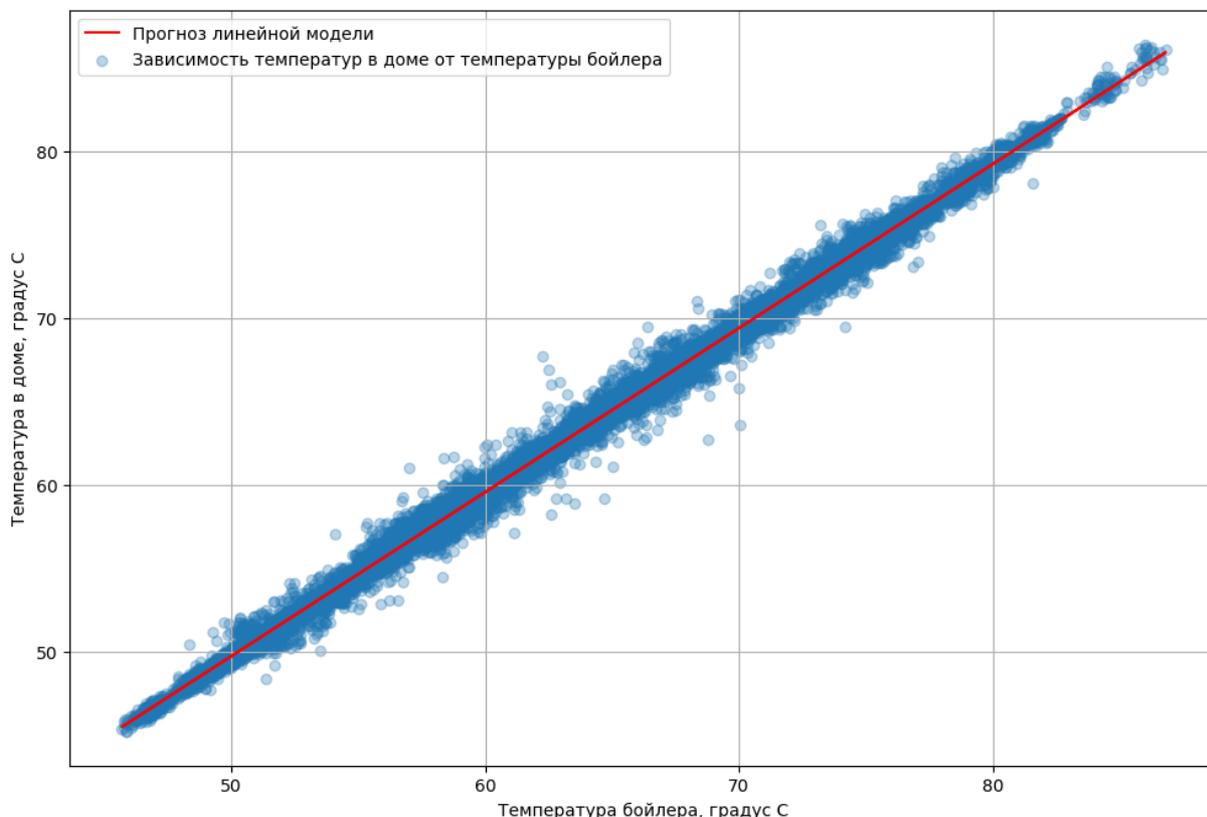


Рис. 3. Визуализация распределения зависимости температуры на входе в дом № 5 из выборки данных от температуры на выходе котельной
Fig. 3. Visualization of the distribution of the dependence of the temperature at the entrance to house No. 5 from the data sample on the temperature at the outlet of the boiler room

По визуализации можно увидеть, что данные в выборке имеют значительный разброс, различный во всем диапазоне, а линейная модель неточно их описывает. Предположительно, такое поведение связано с переходными процессами, происходящими в системе теплоснабжения при изменении температуры на улице, а также при изменении температуры теплоносителя. Для учета этих изменений было предложено использовать модель на основе деревьев решений XGBoost [7]. В основе этого алгоритма лежит техника, которая называется градиентный бустинг. При использовании этой техники модель строится в форме ансамбля слабых предсказывающих моделей, в данном случае деревьев решений. Обучение ансамбля проводится итерационно. На каждой итерации вычисляется ошибка в работе ансамбля, построенного на предыдущей итерации. Следующая модель, которая будет добавлена в ансамбль, будет построена так, чтобы исправить эту ошибку. Таким образом, добавив предсказания нового дерева к предсказаниям ансамбля, возможно уменьшить среднее отклонение модели. Новые модели добавляются в ансамбль до тех пор, пока ошибка уменьшается либо пока не выполняется одно из правил ранней остановки.

В качестве входных данных для модели XGBoost была выбрана температура в подающем трубопроводе котельной из набора данных, а также сконструированные признаки:

- температура на выходе котельной в текущий момент времени;
- изменение температуры на выходе котельной за последний час (разница с учётом знака между температурой сейчас и час назад);
- изменение температуры на улице за последние 3 часа (разница с учётом знака между температурой сейчас и три часа назад);

- текущее значение температуры на улице;
- прогнозное изменение температуры на улице через час.

В ходе работы было высказано предположение, что учёт таких параметров, как изменение температуры на выходе котельной за последний час и изменение температуры на улице за последние 3 часа, позволит учесть переходные процессы, происходящие в системе теплоснабжения.

Оценки качества работы модели XGBoost для прогнозирования температуры теплоносителя на входе в дома приведены в табл. 2.

Графики прогнозных температур для линейной модели и модели XGBoost для домов № 2 и № 3 из набора данных можно увидеть на рис. 4 и 5 соответственно.

Таблица 2

Показатели точности работы моделей XGBoost для прогнозирования теплоносителя на входе в дома из выборки

Table 2

Accuracy indicators of XGBoost models for predicting the coolant at the entrance to houses from the sample

№ дома в выборке данных	Среднее квадратичное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С	Максимальное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С
1	0,98	3,78
2	0,19	4,2
3	0,21	4,4
4	0,11	4,7
5	0,22	4,3
6	0,43	3,4
7	0,37	2,9
8	0,93	4,1
9	0,22	3,1
10	0,32	2,7

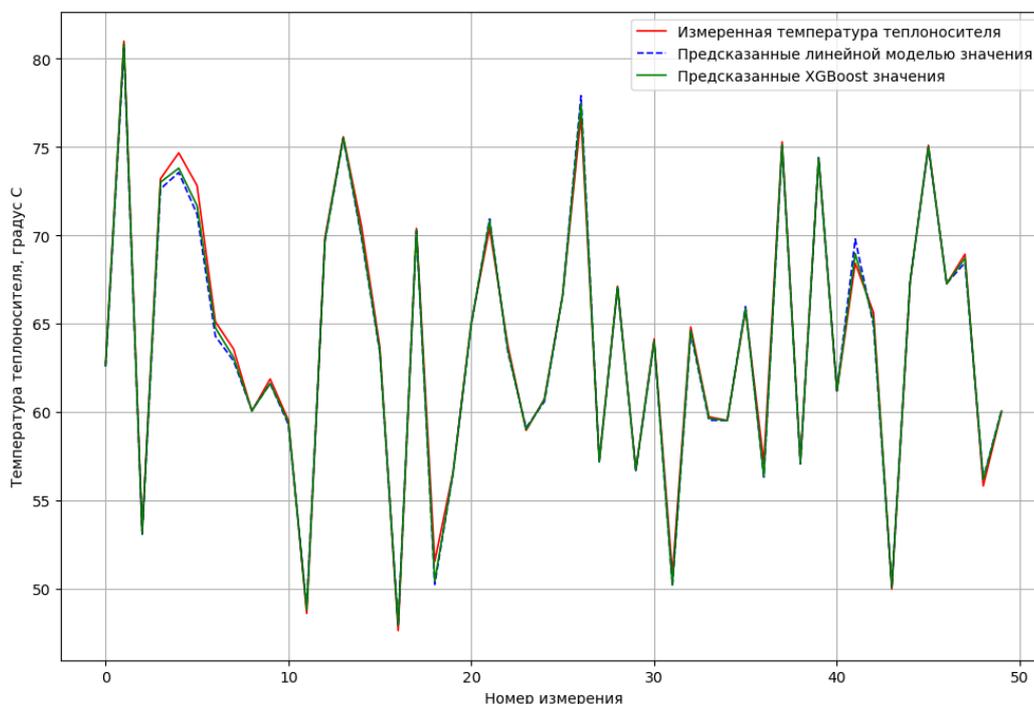


Рис. 4. Измеренные значения температуры теплоносителя и предсказанные модели на основе данных для дома № 2 из выборки данных
Fig. 4. Measured values of coolant temperature and predicted by models based on data for house No. 2 from the data sample

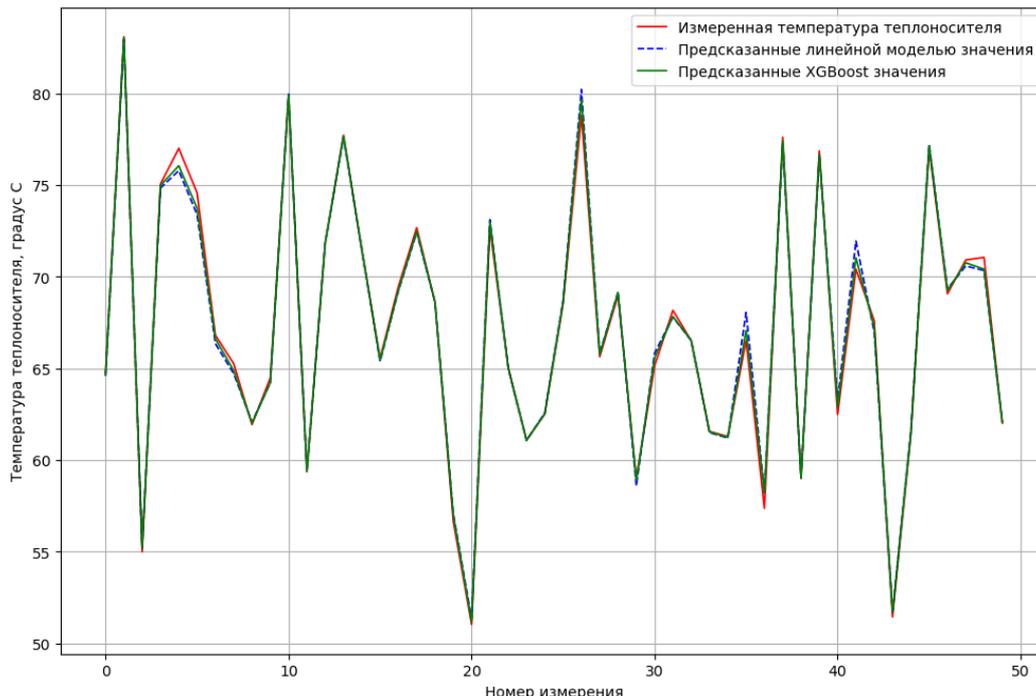


Рис. 5. Измеренные значения температуры теплоносителя и предсказанные модели на основе данных для дома № 3 из выборки данных
Fig. 5. Measured values of coolant temperature and predicted by models based on data for house No. 3 from the data sample

Сравнение точности моделей проводилась по величине средней квадратичной ошибки, а также максимальной абсолютной величине разности между вычисленной и измеренной температурами. Результаты сравнения можно увидеть в табл. 3. По приведенным результатам можно увидеть, что модель XGBoost практически во всех случаях показала лучшие результаты.

Таблица 3

Сравнение результатов работы линейной модели и XGBoost прогнозирования температуры теплоносителя на входе в дома

Table 3

Comparison of the results of the linear model and XGBoost for predicting the coolant temperature at the entrance to houses

№ дома в выборке данных	Среднее квадратичное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С		Максимальное отклонение вычисленной температуры от измеренной, °С	
	Линейная модель	XGBoost	Линейная модель	XGBoost
1	1,26	0,98	5,4	3,78
2	0,27	0,19	6,0	4,2
3	0,28	0,21	6,1	4,4
4	0,10	0,11	4,8	4,8
5	0,27	0,22	5,2	4,3
6	0,61	0,43	4,2	3,4
7	0,43	0,37	3,7	2,9
8	1,12	0,93	5,2	4,1
9	0,35	0,22	3,8	3,1
10	0,39	0,32	3,4	2,7

Заключение

В ходе работы была выполнена подготовка данных, обучение двух моделей и сравнение результатов их работы при прогнозировании поведения городской сети теплоснабжения. Модель

XGBoost при обучении на данных, содержащих сконструированные признаки, показала лучший результат, чем линейная модель, обученная только на температуре теплоносителя на выходе из котельной. Логичным продолжением данной работы будет расчёт экономической эффективности применения данной модели и апробация её в реальных условиях.

Список литературы

1. Белоусов О.А., Иванов С.В. Интеллектуальная система управления и мониторинга газовой котельной // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 75–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-upravleniya-i-monitoringa-gazovoy-kotelnoy> (дата обращения: 01.03.2024).
2. Пинчук В.А. Методы управления режимами тепловых сетей // Вестник магистратуры. 2021. № 1-5 (112). С. 83–94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-upravleniya-rezhimami-teplovyh-setey> (дата обращения: 12.03.2024).
3. Штым К.А. Котельные установки с топливно-реверсивными циклонно-вихревыми предтопками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S4-3. С. 3–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kotelnye-ustanovki-s-toplivno-reversivnymi-tsiklonno-vihrevymi-predtopkami> (дата обращения: 12.03.2024).
4. Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования / Г.В. Нетбай, В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов, Р.Р. Каримов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 3. С. 29–38. DOI: 10.14529/ctcr200303
5. Банников Р.Ю., Нетбай Г.В., Онискив В.Д., Столбов В.Ю. Нейросетевое управление городской системой теплоснабжения с учетом прогнозных данных // Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. М., 2021. С. 167–177. DOI: 10.25728/ubs.2021.015
6. Цифровизация в теплоснабжении поможет сэкономить и уменьшить число аварий [Электронный ресурс]. URL: <https://finance.rambler.ru/other/43358259/> (дата обращения: 20.01.2024).
7. Ясницкий Л.Н. Интеллектуальные системы. М.: Лаборатория знаний, 2016. 221 с.
8. Naik K., Ianakiev A. Heat demand prediction: A real-life data model vs simulated data model comparison // Energy Reports. 2021. Vol. 7, sup. 4. P. 380–388. DOI: 10.1016/j.egyр.2021.08.093
9. Культяев С.Г., Малая Э.М. Модель термoeкономической оптимизации распределительных тепловых сетей // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17, вып. 6. С. 1590–1593. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelitelnyh-teplovyh-setey> (дата обращения: 12.03.2024).
10. Лаптев С.В. Системы управления котельными установками // Известия ТРТУ. 2004. № 1 (36). С. 152–153. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-kotelnyimi-ustanovkami> (дата обращения: 12.03.2024).
11. Heating and cooling networks: A comprehensive review of modelling approaches to map future directions / A. Brown, A. Foley, D. Laverty et al. // Energy. 2022. Vol. 261 (13). P. 125060. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125060
12. Банникова С.А., Захаров В.М., Козлова М.В. Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации // Вестник ИГЭУ. 2019. № 1. С. 5–11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-teplovyh-poter-seti-teplosnabzheniya-dlya-ih-ispolzovaniya-v-ustroystve-utilizatsii> (дата обращения: 12.03.2024).
13. Tianqi C., Guestrin C. Scalable Tree Boosting System // KDD 2016: 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, August 13–17, 2016. NY: ACM, 2016. P. 785–794.
14. Васильев Г.В., Бердоносоев В.Д. Методика по эффективному применению гибридных моделей нейронных сетей для прогнозирования энергопотребления // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4 (57). С. 88–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-po-effektivnomu-primeneniyu-gibridnyh-modeley-neyronnyh-setey-dlya-prognozirovaniya-energopotrebleniya> (дата обращения: 12.03.2024).

References

1. Belousov O.A., Ivanov S.V. [Intelligent Control System and Monitoring of a Gas Boiler]. *Software & Systems*. 2012;(1):75–80. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-upravleniya-i-monitoringa-gazovoy-kotelnoy> (accessed 01.03.2024).
2. Pinchuk V.A. [Methods of controlling heat network modes]. *Vestnik magistratury*. 2021;1-5(112): 83–94. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-upravleniya-rezhimami-teplovyyh-setey> (accessed 12.03.2024).
3. Shtym K.A. Boilers with fuel reversible cyclone-vortex burners. *Mining informational and analytical bulletin*. 2014;S4-3:3–12. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kotelnye-ustanovki-s-toplivno-reversivnymi-tsiklonno-vihrevymi-predtopkami> (accessed: 12.03.2024).
4. Netbay G.V., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu., Karimov R.R. Management of a Local Urban Heat Supply System Based on Neural Network Modeling Taking into Account the Weather Forecast. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(3):29–38. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200303
5. Bannikov R.Yu., Netbay G.V., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu. Neural network management of the city heat supply system taking into account forecast data. In: *Upravlenie bol'shimi sistemami: trudy XVII Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Management of large systems: proceedings of the XVII All-Russian School-Conference of Young Scientists]. Moscow; 2021. P. 167–177. DOI: 10.25728/ubs.2021.015
6. *Tsifrovizatsiya v teplosnabzhenii pomozhet sekonomit' i umen'shit' chislo avari* [Digitalization in heat supply will help to save money and reduce the number of accidents]. (In Russ.) Available at: <https://finance.rambler.ru/other/43358259/> (accessed 20.01.2024).
7. Yasnitskiy L.N. *Intellektual'nye sistemy* [Intelligent systems]. Moscow: Laboratoriya znaniy; 2016. 221 p. (In Russ.)
8. Naik K., Ianakiev A. Heat demand prediction: A real-life data model vs simulated data model comparison. *Energy Reports*. 2021;7(4):380–388. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.093
9. Kulyayev S.G., Malaya E.M. Thermo-economic model of optimization of district heating network. *Tambov university reports. Series: Natural and technical sciences*. 2012;17(6):1590–1593. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelitelnyh-teplovyyh-setey> (accessed 12.03.2024).
10. Laptev S.V. [Boiler plant control systems]. *Izvestiya TRTU*. 2004;1(36):152–153. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-kotelnyimi-ustanovkami> (accessed 12.03.2024).
11. Brown A., Foley A., Laverty D., McLoone S., Keatley P. Heating and cooling networks: A comprehensive review of modelling approaches to map future directions. *Energy*. 2022;261(13):125060. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125060
12. Bannikova S.A., Zakharov V.M., Kozlova M.V. Experimental estimation of thermal losses of the heat supply network for using them in a recovery device. *Bulletin ISPEU = Vestnik IGEU*. 2019;(1):5–11. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-teplovyyh-poter-seti-teplosnabzheniya-dlya-ih-ispolzovaniya-v-ustroystve-utilizatsii> (accessed 12.03.2024).
13. Tianqi C., Guestrin C. Scalable Tree Boosting System. In: *KDD 2016: 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, August 13–17, 2016*. NY: ACM, 2016. P. 785–794.
14. Vasilev G.V., Berdonosov V.D. Methodology for effective application of hybrid models of neural networks for energy consumption prediction. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2022;4(57):88–95. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-po-effektivnomu-primeneniyu-gibridnyh-modeley-neyronnyh-setey-dlya-prognozirovaniya-energopotrebleniya> (accessed 12.03.2024).

Информация об авторах

Столбов Валерий Юрьевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; valeriy.stolbov@gmail.com.

Нетбай Георгий Владимирович, аспирант, инженер кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; netbay.georgij@gmail.com.

Information about the authors

Valery Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; valeriy.stolbov@gmail.com.

Georgij V. Netbay, Postgraduate student, Engineer of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; netbay.georgij@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 13.03.2024

The article was submitted 13.03.2024

ФОРМАЛИЗМ РЕШЕНИЯ ПЕРВОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ШАГАЮЩИХ И КОЛЕСНО-ШАГАЮЩИХ МАШИН

А.И. Телегин¹, teleginai@susu.ru

Е.В. Гусев², gusev@susu.ru

Г.И. Волович³, g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

С.Г. Некрасов², nekrasovsg@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,
Миасс, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. Целью исследования является решение первой задачи динамики машин, перемещающих свой корпус при помощи ног, т. е. вычисление управляющих воздействий приводов ног, обеспечивающих заданную динамику абсолютного движения корпуса и удовлетворяющих ограничениям, при выполнении которых отсутствует скольжение опорных ног относительно опорной поверхности. **Методы исследования** относятся к системному анализу, механике систем тел и робототехнике. Рассматриваются шагающие и колесно-шагающие машины, к корпусу которых подвешены ноги, у которых последняя кинематическая пара является поступательной, управляемая стопа отсутствует и нога с опорной поверхностью взаимодействуют в одной точке. **Результаты исследования** содержат аналитические формулы для вычисления динамических реакций в точках контакта ног с опорной поверхностью, а также движущие силы и моменты сил в приводах опорных и переносных ног, обеспечивающих заданное движение корпуса относительно опорной поверхности, а также ему соответствующие относительные движения тел опорных ног. Описывается формализм решения таких задач, основанный на обратных векторных рекуррентных формулах вычисления сил и моментов сил динамических реакций в кинематических парах древовидных систем тел с замыканием последнего тела ветви на опорную поверхность. Этот формализм распространяется на колесные, колесно-шагающие и шагающие машины, что продемонстрировано на соответствующих примерах. Записываются аналитические условия реализации шага без проскальзывания опорных ног относительно опорной поверхности. Предложены две простые колесно-шагающие машины, состоящие из линейного электропривода и ведомой (пассивной) колесной пары, которые предназначены для экспериментального определения значений коэффициентов трения скольжения и качения. В аналитических видах выведенных расчетных формул (уравнений и неравенств) явно выражены структурные, геометрические, инерционные и кинематические параметры исследуемых машин. Предложенный формализм демонстрируется на решениях четырех задач от простого к сложному через повторное использование формул. **Заключение.** Полученные математические модели можно использовать в процессах расчета и конструирования аналогичных машин и их макетов.

Ключевые слова: шагающая машина, колесно-шагающая машина, рекуррентные формулы, уравнения динамики, динамические реакции, трение скольжения, трение качения

Для цитирования: Формализм решения первой задачи динамики шагающих и колесно-шагающих машин / А.И. Телегин, Е.В. Гусев, Г.И. Волович, С.Г. Некрасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 39–55. DOI: 10.14529/ctcr240204

FORMALISM FOR SOLVING THE FIRST PROBLEM OF THE DYNAMICS OF WALKING AND WHEEL-WALKING MACHINES

A.I. Telegin¹, teleginai@susu.ru

E.V. Gusev², gusevev@susu.ru

G.I. Volovich³, g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

S.G. Nekrasov², nekrasovsg@susu.ru

¹ South Ural State University, Miass, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The aim is to solve the first problem of the dynamics of machines moving their bodies with the help of legs, i.e., to calculate the control actions of the leg actuators that provide the given dynamics of the absolute motion of the body and satisfy the constraints, when fulfilled, there is no sliding of the supporting legs relative to the supporting surface. The research methods are related to system analysis, mechanics of body systems and robotics. We consider walking and wheel-walking machines with legs suspended from the body, in which the last kinematic pair is translational, there is no controlled foot, and the foot and the supporting surface interact at a single point. The results of the study contain analytical formulas for calculating dynamic reactions at the points of contact between the legs and the supporting surface, as well as driving forces and moments of forces in the drives of the supporting and carrying legs, providing a given motion of the body relative to the supporting surface, as well as its corresponding relative motion of the bodies of the supporting legs. A formalism for solving such problems is described, based on inverse vector recurrence formulas for calculating forces and moments of forces of dynamic reactions in kinematic pairs of tree-like systems of bodies with closure of the last body of the branch on the supporting surface. This formalism is extended to wheeled, wheel-walking and walking machines, which is demonstrated by appropriate examples. Analytical conditions for realizing a step without slipping of the support legs relative to the support surface are written down. Two simple wheel-walking machines, consisting of a linear electric drive and a driven (passive) wheelset, are proposed for the experimental determination of sliding and rolling friction coefficient values. In analytical forms of deduced calculation formulas (equations and inequalities) the structural, geometric, inertial and kinematic parameters of the investigated machines are explicitly expressed. The proposed formalism is demonstrated on the solutions of four problems from simple to complex through the reuse of formulas. **Conclusion.** The obtained mathematical models can be used in the processes of calculation and design of similar machines and their layouts.

Keywords: walking machine, wheel-walking machine, recurrence formulas, equations of dynamics, dynamic reactions, sliding friction, rolling friction

For citation: Telegin A.I., Gusev E.V., Volovich G.I., Nekrasov S.G. Formalism for solving the first problem of the dynamics of walking and wheel-walking machines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):39–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240204

Введение

Шагающая машина (ШМ) – это древовидная система тел с переменной структурой, ветви которой периодически замыкаются на опорную поверхность (ОП) и размыкаются в процессе перехода ноги из опорного состояния в переносное. ШМ обеспечивает перемещение своего корпуса за счет относительных движения тел опорных ног. Во многих областях деятельности человека по сравнению с традиционными транспортными средствами автоматически управляемые ШМ оказываются вне конкуренции. К таким областям относятся: транспортные, грузоподъемные и монтажные операции на сложной местности и в условиях чрезвычайных ситуаций (зоны разрушений, горная местность, откосы дорожного полотна и др.); перемещение при минимальных повреждениях поверхностного слоя земли; перемещение в среде, для которой характерны узкие проходы, спуски, подъемы, выступы и т. п. [1–3].

Использование ног в качестве движителей позволяет повысить профильную проходимость и перемещаться по сильно пересеченной местности. За счет изменения движения ног относительно корпуса ШМ может обеспечить комфортабельное движение своего корпуса при перемещении по поверхности с неровностями, достигающими величины дорожного просвета, и компенсировать деформацию грунта в точках опоры ног. Высокая маневренность и возможность адаптации позволяют использовать ШМ в помещениях, приспособленных для человека (лестничные марши, узкие коридоры с поворотами на 90 градусов, дверные проемы). ШМ способны перемещаться вперед, назад, вбок, совершать повороты и развороты на месте, перемещаться под произвольным углом между направлением движения и продольной осью ШМ [4, 5].

ШМ можно использовать в качестве многоцелевой шасси-платформы, имеющей высокую проходимость и способную доставлять в нужное место и обеспечивать функционирование технологического оборудования, средств обезвреживания мин, доставки на исходную позицию средств ведения боевых действий с танками, вертолетами и другими боевыми единицами противника с максимальной эффективностью и минимальным риском для личного состава армии [6].

В середине 80-х годов прошлого столетия во многих странах приступили к созданию ШМ, предназначенных для ликвидации последствий аварий на АЭС. Они конструировались для целей перемещения в замкнутых пространствах (в помещениях ограниченного объема). Такие ШМ способны протискиваться в проломы, спускаться и подниматься по лестничным маршам, избегать провалов в полу и т. д. При ликвидации последствий крупных техногенных аварий и катастроф возникает потребность проведения ремонтных и спасательных работ, разведки местности и очистки территорий в особо опасных условиях для людей (радиоактивных, токсичных, взрывоопасных средах, под водой, в шахтах, в завалах и др.), в которых колесные и гусеничные автоматические управляемые транспортные средства не работоспособны [7–9].

Одной из ключевых задач при организации движения ШМ по ОП является определение динамических реакций в точках опоры ног. Для заданного движения корпуса и ног реакции в точках опоры определены, как правило, неоднозначно. Эта неопределенность связана с недостаточным количеством уравнений для однозначного вычисления указанных реакций. Задачу снятия этой неопределенности решают по-разному. В монографии [7], например, рассматривается задача оптимального распределения реакций по точкам опоры, которая сводится к задачам линейного и квадратичного программирования. Часто используют датчики, измеряющие опорные реакции в местах контакта ног с ОП [10–12]. В настоящей статье указанная неопределенность снимается либо путем использования пассивных кинематических пар (КП), либо использованием модели Кулона с условием отсутствия проскальзывания опорной ноги относительно ОП. В последнем примере настоящей статьи демонстрируются оба подхода.

Моделирование ШМ иногда начинают с моделирования колесно-шагающей машины (КШМ), у которой конструкция одной или двух ног повторяет конструкцию ног ШМ. Это позволяет на простых моделях решить ряд задач, возникающих в расчетах ШМ.

Постановка задачи: рассмотреть класс ШМ и КШМ, у которых движителем является одна или несколько ног, подвешенных к корпусу, где последняя кинематическая пара каждой ноги является поступательной; разработать формализм вывода формул вычисления динамических реакций в опорных точках ног, а также движущих сил и моментов сил в кинематических парах ног для заданных абсолютных ускорений центров масс и скоростей кинетических моментов относительно центров масс каждого тела рассматриваемых машины; привести примеры, в которых записать условия реализации шага без проскальзывания опорных ног относительно ОП.

1. Основные расчетные формулы

Тело с порядковым номером i и его массу обозначим через m_{oi} . Для сокращения записей будем использовать следующие аббревиатуры: ПТ(i) – полюс тела m_{oi} ; ЦМ(i) – центр масс тела m_{oi} ; БТ(i) – база тела m_{oi} ; КП(i) – кинематическая пара, связывающая тело m_{oi} с БТ(i); ПКП(i) – поступательная КП(i); ВКП(i) – вращательная КП(i). Будем использовать следующие обозначения: O_j – ПТ(j); C_j – ЦМ(j); \overline{W}_{cj} – абсолютное ускорение ЦМ(j); $P_j = m_{oj}g$ – вес тела m_{oj} ; $a_j = |\overline{O_jC_j}|$ – расстояние от ПТ(j) до ЦМ(j); \overline{c}_j – орт, указывающий направление из ПТ(j) в ЦМ(j); \overline{y} – орт вертикали; g – ускорение свободного падения; \overline{K}_{cj} – кинетический момент тела

m_{oj} относительно ЦМ(j); S_j – множество номеров тел, образующих КП с телом m_{oj} ; $\bar{R}_k = \bar{O}_j \bar{O}_k$ – межполюсный вектор КП(k) для $k \in S_j$, т. е. $j = k - 1$; \bar{F}_j^r, \bar{M}_j^r – главный вектор и момент относительно ПТ(j) сил реакций, действующих на тело m_{oj} со стороны мысленно разорванных связей при переходе от древовидной системы тел с циклами (с замкнутыми ветвями) к системе тел с открытыми ветвями, а также изоляции системы тел от действия внешней среды.

Согласно утверждению 7 книги [13] сила \bar{F}_i и момент силы \bar{M}_i относительно ПТ(i), действующие на тело m_{oi} со стороны БТ(i), можно вычислять по следующим векторным обратным рекуррентным формулам (ОРФ):

$$\bar{F}_j = m_{oj} \bar{W}_{cj} + P_j \bar{y} - \bar{F}_j^r + \sum_{k \in S_j} \bar{F}_k, \quad (1)$$

$$\bar{M}_j = a_j \bar{c}_j \times (m_{oj} \bar{W}_{cj} + P_j \bar{y}) + \bar{K}_{cj} - \bar{M}_j^r + \sum_{k \in S_j} (\bar{R}_k \times \bar{F}_k + \bar{M}_k), \quad (2)$$

где $j = N, N - 1, \dots, i$; N – номер последнего тела системы тел.

Если концевое тело m_{ok} является колесом и ЦМ(k) лежит на оси его вращения, то, совместив ПТ(k) с ЦМ(k), получим $a_k = 0$ и уравнение (2) примет вид

$$\bar{M}_k = \bar{K}_{ck} - \bar{M}_k^r. \quad (3)$$

Для системы тел на плоскости

$$\bar{K}_{cj} = I_j^c \ddot{\alpha}_j \bar{q}, \quad (4)$$

где I_j^c – момент инерции тела m_{oj} относительно оси $C_j \bar{q}$; $\ddot{\alpha}_j$ – абсолютное угловое ускорение тела m_{oj} ; \bar{q} – орт нормали к плоскости движения тел.

Из \bar{F}_k и \bar{M}_k можно выделить динамические реакции (реактивные составляющие), движущие силы и моменты сил. Реактивные составляющие удерживают тело m_{ok} от относительных движений, недопускаемых связями. Движущие составляющие обеспечивают относительные движения тела m_{ok} в направлениях, допускаемых связями.

В ПКП(k) тело m_{ok} может двигаться поступательно относительно БТ(k) вдоль оси $O_k \bar{p}_k$, жестко связанной с телом m_{ok} , где \bar{p}_k – орт оси ПКП(k), указывающий положительное направление поступательного движения. В ПКП(k) сила реакции \bar{F}_{rk} , перпендикулярная оси $O_k \bar{p}_k$, и момент силы \bar{M}_k относительно ПТ(k) являются реактивными. Вектор \bar{M}_k неизвестен по модулю и направлению. Для \bar{F}_{rk} неизвестны модуль и направление в плоскости, перпендикулярной оси $O_k \bar{p}_k$. Следовательно,

$$\bar{F}_k = \bar{F}_{rk} + F_k \bar{p}_k, \quad (5)$$

где $\bar{p}_k \cdot \bar{F}_{rk} = 0$, $F_k = \bar{p}_k \cdot \bar{F}_k$ – сумма движущей силы и силы трения в ПКП(k). Если в ПКП движущая сила отсутствует, то F_k – сила трения в ПКП(k).

В ВКП(k) тело m_{ok} может вращаться относительно БТ(k) вокруг оси $O_k \bar{q}_k$, где \bar{q}_k – орт оси ВКП(k) и положительным считается вращение против хода стрелки часов. К реактивным в ВКП(k) относится сила реакции \bar{F}_k , неизвестная по модулю и направлению, и момент \bar{M}_{rk} относительно ПТ(k) силы реакции. Момент \bar{M}_{rk} перпендикулярен оси $O_k \bar{q}_k$. Следовательно,

$$\bar{M}_k = \bar{M}_{rk} + M_k \bar{q}_k, \quad (6)$$

где $\bar{q}_k \cdot \bar{M}_{rk} = 0$, $M_k = \bar{q}_k \cdot \bar{M}_k$ – сумма движущего момента силы и момента силы трения в ВКП(k) относительно оси $O_k \bar{q}_k$. Если в ВКП(k) движущий момент силы отсутствует, то M_k – момент силы трения в ВКП(k) относительно оси $O_k \bar{q}_k$.

2. Колесно-шагающие машины и виды трения

Для исследования необходимых условий выполнения шага рассмотрим примеры моделирования КШМ.

КШМ состоит из корпуса m_{o1} , на одном конце которого установлена колесная пара, а на другом подвешены одна или две ноги. КШМ с одной ногой предназначена для исследования необходимых условий выполнения одного шага, энергетических затрат на его реализацию, потребляемой и рассеиваемой мощности привода ноги, а также экспериментального определения трения скольжения, качения и верчения. КШМ с двумя ногами часто называют – рикша, которую в основном

используют для исследования ходьбы по горизонтальной или наклонной прямой. На рис. 1 изображена простейшая КШМ в вертикальной плоскости с одной однозвенной ногой, образующей с корпусом ПКП, в которой горизонтальный корпус является направляющей. На рис. 2 изображена КШМ с полярной ногой, в которой корпус и нога меняют свою ориентацию в процессе выполнения шага. Для создания макетов таких КШМ необходима одна ПКП и колесная пара. КШМ на рис. 1, 2 состоят из трех тел, их движителем является ПКП с приводом (активная ПКП). КШМ на рис. 3, 4 состоят из четырех тел. Движитель (нога) КШМ на рис. 3 состоит из двух активных ПКП. Нога КШМ на рис. 4 содержит активную ВКП, за которой следует активная ПКП.

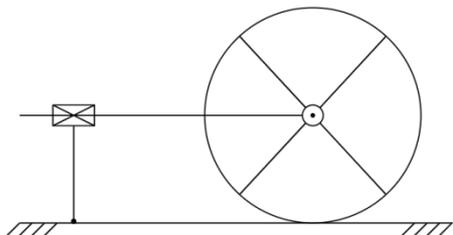


Рис. 1. Простейшая колесо-шагающая машина
Fig. 1. The simplest wheeled walking machine

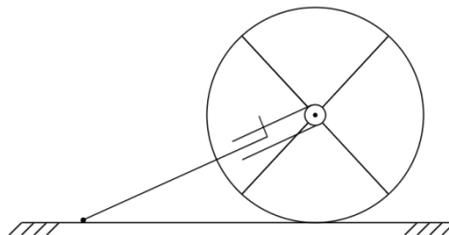


Рис. 2. Колесо-шагающая машина с полярной ногой
Fig. 2. A wheel-walking machine with a polar foot

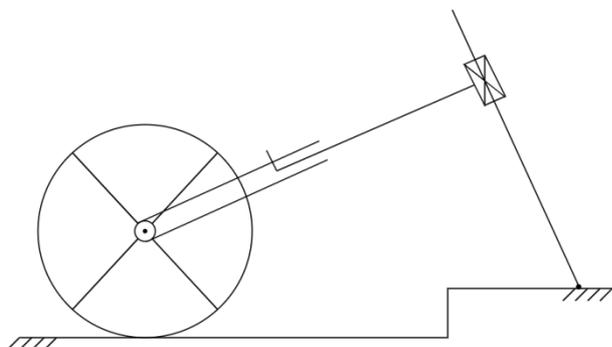


Рис. 3. Колесо-шагающая машина
с декартовой ногой
Fig. 3. Wheel-walking machine with a Cartesian foot

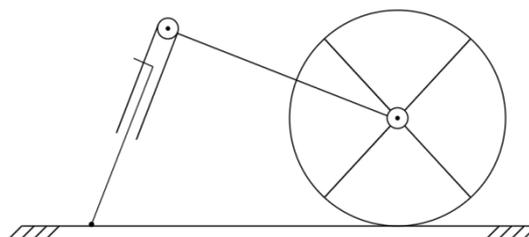


Рис. 4. Колесо-шагающая машина
с полярной ногой и корпусом
Fig. 4. Wheel-walking machine with polar foot and hull

КШМ в горизонтальной плоскости с двумя трехзвенными декартовыми, цилиндрическими или ангулярными ногами моделируют для исследования ходьбы по горизонтальной и наклонной плоскости. КШМ с двумя трехзвенными сферическими или ангулярными ногами моделируют для исследования ходьбы по сложной ОП в пространстве. Смотрите, например, двухногую КШМ в монографии [8, с. 239].

В процессе моделирования, расчета, конструирования и создания прототипа ШМ рекомендуется создать и исследовать макет КШМ, у которой конструкция ноги совпадает с конструкциями ног ШМ [8]. Например, перед моделированием ШМ на рис. 5 рекомендуется рассмотреть КШМ на рис. 4.

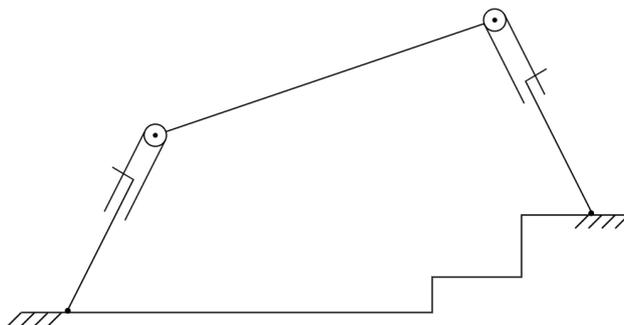


Рис. 5. Схема макета шагающей машины для исследования одного шага
Fig. 5. Schematic diagram of a mock-up of a walking machine for a single step study

Без наличия трения в точке контакта стопы КШМ с ОП организовать движение его корпуса относительно ОП невозможно. Поэтому коротко обсудим виды трения, действующие на тела КШМ.

Трение является причиной сопротивления движению соприкасающихся тел относительно друг друга. В зависимости от относительного движения трущихся тел различают трение скольжения, трение качения и трение верчения. На практике перечисленные виды трения могут иметь место одновременно, например, колеса автомобиля могут одновременно катиться, скользить и вертеться на поворотах. В КШМ при взаимодействии колеса с ОП могут иметь место одновременно все три вида трения, а при взаимодействии ноги с ОП может одновременно иметь место трение скольжения и верчения.

При движении или стремлении двигать одно тело по поверхности другого в касательной плоскости поверхностей соприкосновения тел возникает сила трения скольжения, которую иногда называют трением первого рода [14]. Эта сила трения препятствует скольжению взаимодействующих тел относительно друг друга. Если колесо катить или стремиться катить по ОП, то кроме силы трения скольжения из-за деформации поверхностей взаимодействующих тел дополнительно возникает пара сил, препятствующая качению колеса, которую иногда называют трением второго рода [14].

ОП является связью для концевых тел (колес и стоп ног) КШМ. Если поверхности соприкасающихся тел абсолютно гладкие, то реакция ОП направлена по нормали к общей касательной в точке контакта и ее направление не зависит от действия на ногу активных сил приводов ее тел. От этих сил зависит только модуль (числовая величина) силы реакции. В действительности абсолютно гладких ОП как и абсолютно твердых тел не бывает. Все тела деформируемы и их поверхности в той или иной степени шероховаты. Поэтому реакция ОП зависит от активных сил приводов ноги как по величине, так и по направлению, т. е. ее можно разложить на составляющие, одна из которых направлена по общей нормали к поверхности соприкосновения, а другая (сила трения скольжения) лежит на этой поверхности.

Если конец последнего тела m_{ok} ноги соприкасается с ОП, то сила \vec{F}_k^r реакции шероховатой ОП, действующая на тело m_{ok} , зависит от активных сил в КП ноги как по величине, так и по направлению. Если \vec{F}_k^r разложить на составляющие, одна из которых \vec{F}_{yk} направлена по общей нормали к поверхности соприкосновения, а другая \vec{F}_{tk} находится в касательной плоскости к этим поверхностям, то составляющая \vec{F}_{tk} является силой трения скольжения, а составляющая \vec{F}_{yk} – нормальной реакцией. По модели Кулона модули этих составляющих связаны друг с другом. Если сила реакции \vec{F}_k^r уравнивает активные силы (движущие силы приводов ноги), то $F_{tk} \leq f_0 F_{yk}$, $F_{tk} = f F_{yk}$ где f_0 – коэффициент трения покоя, f – коэффициент трения скольжения ($f < f_0$). В первой задаче динамики машины абсолютное движение корпуса и ног задается. Поэтому часто удается определить направление реакции \vec{F}_{tk} . Например, если в плоской модели КШМ или ШМ корпус движется вдоль оси $O\bar{x}$, то $\vec{F}_{tk} = -\vec{F}_{xk}$ и

$$\vec{F}_k^r = -F_{xk}\bar{x} + F_{yk}\bar{y}, \quad F_{xk} \leq f_0 F_{yk}, \quad (7)$$

где F_{xk} – модуль силы трения, связанной с силой нормального давления формулой Кулона $F_{xk} = f F_{yk}$. Неравенство в формулах (7) является условием отсутствия проскальзывания ноги ШМ относительно ОП, т. е. это условие реализации шага.

Части тел ВКП, находящиеся в соприкосновении, называют шипом и подшипником. Подшипник воспринимает как радиальную (перпендикулярную оси ВКП), так и аксиальную (коллинарную оси ВКП) нагрузку со стороны шипа. Моменты сил трения, вызванные каждой нагрузкой, определяются отдельно. От радиальной нагрузки модуль момента силы трения в ВКП(k) вычисляется по формуле [15]

$$M_k = r f N_{rk}, \quad (8)$$

где r – радиус шипа и подшипника; f – приведенный коэффициент трения, N_{rk} – радиальная нагрузка в ВКП(k). Величина f безразмерная и зависит от конструкции ВКП [15].

При качении колеса m_{ok} по горизонтальной ОП в результате их деформаций соприкосновение m_{ok} с ОП происходит по небольшой дуге, смещенной в сторону движения вместе с точкой

приложения вектора \vec{F}_k^r . Величину f_t этого смещения называют коэффициентом трения качения. Поэтому модуль силы трения качения, приведенной к оси вращения колеса, вычисляется по формуле [15]

$$M_k^r = |f_t F_{yk} - R F_{xk}|, \quad (9)$$

где R – радиус колеса; F_{xk}, F_{yk} – касательная и нормальная составляющая реакции \vec{F}_k^r ; f_t – коэффициент трения качения.

3. Общий формализм решения первой задачи динамики машин

Для решения первой задачи динамики колесных, колесно-шагающих и шагающих машин рекомендуем последовательно выполнить действия следующих девяти этапов. Подробности этого формализма рассмотрим в процессе решения конкретных задач в порядке от простого к сложному.

Этап 1. Корпус и тела всех движителей (ног и колес с их подвеской) последовательно занумеровать числами 1, 2, 3, 4, ..., N , где N – общее количество подвижных тел машины. Тогда m_{o1} – корпус, m_{o2} – первое тело первого движителя (для ШМ первой ноги), m_{o3} – второе тело первого движителя, m_{o4} – третье тело первого движителя, m_{o5} – первое тело второго (трехзвенного) движителя и так далее. Изобразить кинематическую схему машины в исходном относительном положении тел ВКП, указать ПТ(i) и ЦМ(i), мысленно закрепить за телами связанные системы координат ССК(i) $O_i \bar{x}_i \bar{y}_i \bar{z}_i$, где \bar{x}_i – орт горизонтали, \bar{y}_i – орт вертикали, \bar{z}_i – орт, дополняющий орты \bar{x}_i, \bar{y}_i до правого репера. При необходимости описать параметры q_j относительного положения тел машины. Перечислить нулевые и постоянные значения величин, входящих в формулы (1), (2). Выразить орты $\bar{p}_i, \bar{q}_i, \bar{c}_i$ и межполюсные векторы \bar{R}_i через орты ССК тел или орты $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ правой неподвижной системы координат, где ось $O\bar{x}$ горизонтальна, ось $O\bar{y}$ вертикальна, т. е. $\bar{g} = -g\bar{y}$.

Этап 2. Мысленно устранить связи движителей (колес, ног) с ОП, заменив их реакциями \vec{F}_i^r, \vec{M}_i^r , где $i \in N_o$ – множество номеров последних тел опорных движителей машины (опорных ног). Если на корпус (тело m_{o1}) действуют внешние силы и/или моменты сил, например, порывы ветра, то необходимо их заменить соответствующими реакциями \vec{F}_1^r и/или \vec{M}_1^r .

Этап 3. Для конечного тела m_{oi} по ОРФ (1) выписать формулу

$$\vec{F}_i = m_{oi} \vec{W}_{ci} + P_i \bar{y} - \delta_i \vec{F}_i^r, \quad (10)$$

где $i \in N_e$ – множество номеров конечных тел машины; $\delta_i = 1$ если $i \in N_o$, иначе $\delta_i = 0$.

Если m_{oi-1} – предпоследнее тело движителя, то по ОРФ (1) с учетом (10) выписать формулу

$$\vec{F}_{i-1} = m_{oi-1} \vec{W}_{ci-1} + P_{i-1} \bar{y} + \vec{F}_i = \sum_{j=i-1}^i m_{oj} \vec{W}_{cj} + P_{i-1}^p \bar{y} - \delta_i \vec{F}_i^r, \quad (11)$$

где $P_{i-1}^p = P_{i-1} + P_i = (m_{oi-1} + m_{oi})g$ – вес двух последних тел движителя.

Аналогично, если m_{oi-2} – первое тело движителя, то по ОРФ (1) с учетом (11) выписать формулу

$$\vec{F}_{i-2} = m_{oi-2} \vec{W}_{ci-2} + P_{i-2} \bar{y} + \vec{F}_{i-1} = \sum_{j=i-2}^i m_{oj} \vec{W}_{cj} + P_d \bar{y} - \delta_i \vec{F}_i^r, \quad (12)$$

где $P_d = \sum_{j=i-2}^i P_j = g \sum_{j=i-2}^i m_{oj}$ – вес движителя (ноги).

Этап 4. Для каждой ПКП(i), используя выписанные на этапе 3 силы, записать формулу вычисления искомой движущей силы $F_i = \bar{p}_i \cdot \vec{F}_i$.

Этап 5. По ОРФ (1), используя формулы (12), выписать векторное уравнение

$$\vec{F}_1 = m_{o1} \vec{W}_{c1} + P_1 \bar{y} - \delta_1 \vec{F}_1^r + \sum_{k \in S_1} \vec{F}_k = \sum_{j=1}^N m_{oj} \vec{W}_{cj} + P \bar{y} - \sum_{i \in N_o} \vec{F}_i^r - \delta_1 \vec{F}_1^r = 0, \quad (13)$$

где S_1 – множество номеров тел, смежных корпусу m_{o1} ; $P = \sum_{j=1}^N P_j = g \sum_{j=1}^N m_{oj}$ – вес машины. $\delta_1 = 1$, если \vec{F}_1^r – сила реакции внешней среды, введенная в обращение в процессе изоляции машины от действия внешней среды. Иначе $\delta_1 = 0$. Из векторного уравнения (13) получить два (для модели машины на плоскости) или три скалярных уравнения, т. е. проекции уравнения (13) на оси $O\bar{x}, O\bar{y}, O\bar{z}$. Подробности рассмотрим в конкретных примерах.

Этап 6. По аналогии с этапом 3 для каждого движителя по ОРФ (2) выписать формулы вычисления векторов \vec{M}_i^r , где i пробегает номера тел движителя от последнего до первого.

Для концевой тела m_{oi} по ОРФ (2) выписать формулу

$$\bar{M}_i = a_i \bar{c}_i \times (m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_i \bar{y}) + \bar{K}_{ci} - \delta_i \bar{M}_i^r. \quad (14)$$

Если m_{oi-1} – тело движителя, то по ОРФ (2) выписать формулу

$$\bar{M}_{i-1} = a_{i-1} \bar{c}_{i-1} \times (m_{oi-1} \bar{W}_{ci-1} + P_{i-1} \bar{y}) + \bar{K}_{ci-1} + \bar{R}_i \times \bar{F}_i + \bar{M}_i,$$

где с учетом формул (10), (14) имеем

$$\bar{R}_i \times \bar{F}_i + \bar{M}_i = \bar{R}_i \times (m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_i \bar{y} - \delta_i \bar{F}_i^r) + a_i \bar{c}_i \times (m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_i \bar{y}) + \bar{K}_{ci} - \delta_i \bar{M}_i^r.$$

Следовательно,

$$\bar{M}_{i-1} = \sum_{j=i-1}^i [a_j \bar{c}_j \times (m_{oj} \bar{W}_{cj} + P_j \bar{y}) + \bar{K}_{cj}] + \bar{R}_i \times (m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_i \bar{y} - \delta_i \bar{F}_i^r) - \delta_i \bar{M}_i^r. \quad (15)$$

Аналогично, если m_{oi-2} – тело движителя, то по ОРФ (2) выписать формулу

$$\bar{M}_{i-2} = a_{i-2} \bar{c}_{i-2} \times (m_{oi-2} \bar{W}_{ci-2} + P_{i-2} \bar{y}) + \bar{K}_{ci-2} + \bar{R}_{i-1} \times \bar{F}_{i-1} + \bar{M}_{i-1},$$

где с учетом формул (11), (15) имеем

$$\begin{aligned} \bar{R}_{i-1} \times \bar{F}_{i-1} + \bar{M}_{i-1} &= \bar{R}_{i-1} \times (m_{oi-1} \bar{W}_{ci-1} + m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_{i-1}^p \bar{y} - \delta_i \bar{F}_i^r) + \\ &+ \sum_{j=i-1}^i [a_j \bar{c}_j \times (m_{oj} \bar{W}_{cj} + P_j \bar{y}) + \bar{K}_{cj}] + \bar{R}_i \times (m_{oi} \bar{W}_{ci} + P_i \bar{y} - \delta_i \bar{F}_i^r) - \delta_i \bar{M}_i^r. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{M}_{i-2} &= \sum_{j=i-2}^i [a_j \bar{c}_j \times (m_{oj} \bar{W}_{cj} + P_j \bar{y}) + \bar{K}_{cj}] + m_{oi-1} \bar{R}_{i-1} \times \bar{W}_{ci-1} + \\ &+ m_{oi} (\bar{R}_{i-1} + \bar{R}_i) \times \bar{W}_{ci} + (P_{i-1}^p \bar{R}_{i-1} + P_i \bar{R}_i) \times \bar{y} - \delta_i (\bar{R}_{i-1} + \bar{R}_i) \times \bar{F}_i^r - \delta_i \bar{M}_i^r. \end{aligned} \quad (16)$$

Этап 7. Для каждой активной ВКП(i), используя выписанные на этапе 6 моменты сил, выведем формулы вычисления искомых движущих моментов сил $M_i = \bar{q}_i \cdot \bar{M}_i$.

Этап 8. По ОРФ (2), используя формулы (16), выписать уравнение

$$\bar{M}_1 = a_1 \bar{c}_1 \times (m_{o1} \bar{W}_{c1} + P_1 \bar{y}) + \bar{K}_{c1} - \bar{M}_1^r + \sum_{k \in S_1} (\bar{R}_k \times \bar{F}_k + \bar{M}_k) = 0. \quad (17)$$

Из векторного уравнения (17) получить его проекции на одну, две или три оси $O\bar{x}$, $O\bar{y}$, $O\bar{z}$ в зависимости от подпространства, в котором движется ШМ (вертикальная плоскость, горизонтальная плоскость или пространство $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$).

Этап 9. Из уравнений, полученных на пятом и восьмом этапах, выразить динамические реакции и подставить их в искомые формулы вычисления движущих сил и/или моментов сил, полученных на четвертом и седьмом этапах. Записать условия реализации шага. Подробности продемонстрируем на конкретных примерах.

4. Решение первой задачи динамики колесной машины

Рассмотрим пример решения первой задачи динамики колесной машины с учетом сил трения в ВКП, связывающих кузов (корпус) с колесными парами. В книге [15, с. 205–206] эта задача решена с использованием принципа Даламбера – Лагранжа. В ней рассмотрен прицеп, изображенный на рис. 6 в виде кузова с грузом на двух колесных парах, которые катятся по ОП без скольжения. Корпус движется вдоль оси $O\bar{x}$ с заданным ускорением \ddot{q}_1 . Решим эту задачу по описанному формализму.

Этап 1. Машина состоит из трех тел, т. е. $N = 3$, m_{o1} – корпус, m_{o2} – переднее колесо (колесная пара), m_{o3} – заднее колесо (колесная пара). Колеса взаимодействуют с горизонтальной ОП.

Параметры относительного положения тел: q_1 – величина поступательного перемещения корпуса относительно ОП; $q_2 = q_3$ – углы поворота колес относительно корпуса.

$$a_2 = a_3 = 0, \bar{q}_2 = \bar{q}_3 = \bar{z}, \bar{K}_{c1} = 0, \delta_i = 1, \bar{c}_i = 0, I_2^c = I_3^c.$$

Этап 2. Мысленно разорванные связи колес с ОП в точках A_j заменены реакциями \bar{F}_j^r , \bar{M}_j^r , где $j = 2, 3$. Разложение \bar{F}_j^r на составляющие вдоль осей $O\bar{x}$, $O\bar{y}$ имеет вид (7)

$$\bar{F}_j^r = -F_{xj} \bar{x} + F_{yj} \bar{y}, \quad (18)$$

где F_{xj} – сила трения, приложенная к колесу m_{oj} , F_{yj} – нормальная реакция. Следовательно, согласно (9) момент силы трения относительно оси ВКП(j), действующий со стороны ОП на колесо m_{oj} , вычисляется по формуле

$$\bar{M}_j^r = (f_t F_{yj} - R F_{xj}) \bar{q}_j, \quad (19)$$

где f_t – коэффициент трения качения колеса по ОП.

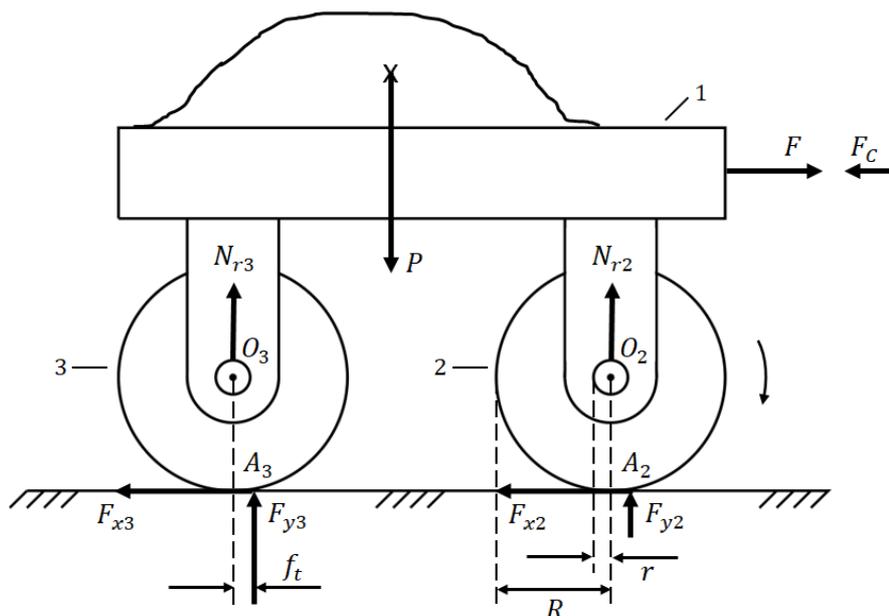


Рис. 6. Колесная машина
Fig. 6. Wheeled car

\bar{F}_1^r – сила реакции внешней среды, введенная в обращение в процессе изоляции машины от действия внешней среды. Прицеп не находится под прикрытием тягача, т. е. сила сопротивления воздуха F_c направлена против тягового усилия F , которое необходимо определить. Таким образом, $\bar{F}_1^r = (F - F_c)\bar{x}$, $\bar{M}_1^r = 0$.

Этап 3. По формуле (10) для $i = 2,3$, учитывая, что $\delta_i = 1$, выпишем

$$\bar{F}_i = m_{oi}\bar{W}_{ci} + P_i\bar{y} - \bar{F}_i^r.$$

Этап 4. ПКП в машине отсутствуют.

Этап 5. По формуле (13) для $i = 1$, учитывая, что $S_1 = \{2,3\}$, $\delta_1 = 1$, получим

$$\bar{F}_1 = \sum_{j=1}^3 (m_{oj}\bar{W}_{cj} - \bar{F}_j^r) + P\bar{y} = 0, \quad (20)$$

где $P = \sum_{j=1}^3 P_j = g \sum_{j=1}^3 m_{oj}$ – вес машины. Проекция уравнения (20) на ось $O\bar{x}$ с учетом (18) имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{x} \cdot \bar{F}_1 &= \bar{x} \cdot (\sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + F_{x2}\bar{x} + F_{x3}\bar{x} - F\bar{x} + F_c\bar{x}) = \\ &= \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + F_{x2} + F_{x3} - F + F_c = 0. \end{aligned}$$

Отсюда искомое тяговое усилие

$$F = \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + F_{x2} + F_{x3} + F_c. \quad (21)$$

Проекция уравнения (20) на ось $O\bar{y}$ с учетом равенств (18), $\bar{y} \cdot \bar{W}_{cj} = 0$ имеет вид

$$\bar{y} \cdot \bar{F}_1 = P - \sum_{k=2}^3 F_{yj} = P - F_{y2} - F_{y3} = 0,$$

т. е. $F_{y2} + F_{y3} = P$ – сила нормального давления прицепа на ОП.

Этап 6. По формуле (14) с учетом формул (4), $\alpha_j = -q_j$, (19) для колес m_{oj} ($j = 2,3$) получим

$$\bar{M}_j = -I_j^c \ddot{q}_j \bar{q}_j - \bar{M}_j^r = -I_j^c \ddot{q}_j \bar{q}_j + (RF_{xj} - f_t F_{yj}) \bar{q}_j. \quad (22)$$

Этап 7. Колеса прицепа являются ведомыми, т. е. ВКП пассивные. Тогда по формуле (6) $M_j = \bar{q}_j \cdot \bar{M}_j$ – момент силы трения, действующей в ВКП(j) со стороны m_{o1} на m_{oj} и вычисляемый по формуле (8), т. е. $\bar{M}_j = rfN_{rj}\bar{q}_j$, где r – радиус шипа и подшипника в модели ВКП; f – приведенный коэффициент трения в ВКП(j), N_{rj} – сила давления кузова с грузом на ось колесной пары m_{oj} . Отсюда с учетом (22) получим

$$rfN_{rj} = -I_j^c \ddot{q}_j + RF_{xj} - f_t F_{yj},$$

т. е. $F_{xj}R = I_j^c \ddot{q}_j + rfN_{rj} + f_t F_{yj}$, $j = 2,3$. После суммирования по j и деления на R получим

$$F_{x2} + F_{x3} = 2I_j^c \ddot{q}_j / R + rf(N_{r2} + N_{r3}) / R + f_t(F_{y2} + F_{y3}) / R,$$

т. е.

$$F_{x2} + F_{x3} = 2I_j^c \ddot{q}_j / R + rfP_1 / R + f_t P / R, \quad (23)$$

так как $N_{r2} + N_{r3} = P_1 = m_{o1}g$, $F_{y2} + F_{y3} = P$.

Этап 8. В выписывании уравнения (17) и выполнении последнего этапа нет необходимости, так как, подставив (23) в (21), получим искомую движущую силу, где

$$\bar{W}_{cj} = \ddot{q}_1 \bar{x}, \quad \ddot{q}_j = \ddot{q}_1 / R, \quad \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj} \bar{W}_{cj} = \ddot{q}_1 \sum_{j=1}^3 m_{oj}.$$

5. Простейшая КШМ

На рис. 7 изображена КШМ, корпус которой образует с ногой активную ПКП и пассивную ВКП с колесной парой. Эта КШМ предназначена для исследования условий реализации одного шага, а также для экспериментального определения коэффициентов трения скольжения и качения. Здесь для решения первой задачи динамики с выводом условий реализации одного шага будем считать, что колесо катится по ОП без скольжения.

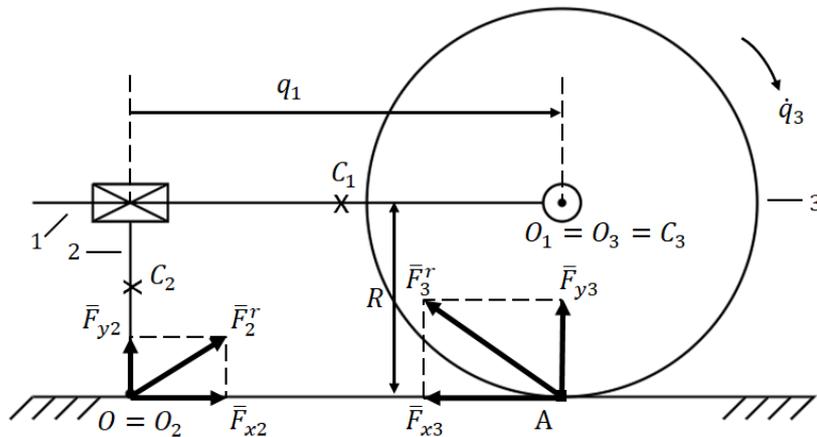


Рис. 7. Простейшая колесно-шагающая машина для исследования одного шага
Fig. 7. The simplest wheel-walking machine for the study of a single step

Этап 1. КШМ состоит из трех тел, т. е. $N = 3$, где m_{o1} – корпус в виде горизонтального цилиндра, m_{o2} – нога в виде вертикального стержня, m_{o3} – колесная пара (далее колесо). Нога и колесо взаимодействуют с ОП.

Параметры относительного положения тел: $q_1 = q_2 = OA$; q_3 – угол поворота колеса относительно корпуса.

$$a_3 = 0, \quad \bar{p}_2 = -\bar{x}, \quad \bar{q}_3 = \bar{z}, \quad \bar{c}_1 = -\bar{x}, \quad \bar{c}_2 = \bar{y}, \quad \bar{c}_3 = 0, \quad \bar{R}_2 = \overline{O_1 O_2} = -q_1 \bar{x} - R \bar{y},$$

$$\bar{R}_3 = \overline{O_1 O_3} = 0, \quad S_1 = \{1, 2\}, \quad \delta_1 = 0, \quad \bar{W}_{c2} = \bar{K}_{c2} = 0, \quad \bar{K}_{c1} = 0.$$

Этап 2. Мысленно разорванные связи ноги и колеса с ОП в точках O_2 и A заменим реакциями \bar{F}_j^r, \bar{M}_j^r , где $j = 2, 3$. Из рис. 7 видно, что разложения \bar{F}_j^r на составляющие вдоль осей $O\bar{x}, O\bar{y}$ имеют вид

$$\bar{F}_2^r = F_{x2} \bar{x} + F_{y2} \bar{y}, \quad \bar{F}_3^r = -F_{x3} \bar{x} + F_{y3} \bar{y}. \quad (24)$$

Следовательно, моменты сил \bar{F}_j^r относительно точек O_j , действующие со стороны ОП на тело m_{oj} , вычисляются по формулам

$$\bar{M}_2^r = 0, \quad \bar{M}_3^r = -RF_{x3} \bar{z}. \quad (25)$$

Этап 3. Для ноги и колеса по формуле (10) с учетом равенств $\bar{W}_{c2} = 0, \delta_2 = 1$ выпишем

$$\bar{F}_2 = m_{o2} \bar{W}_{c2} + P_2 \bar{y} - \delta_2 \bar{F}_2^r = P_2 \bar{y} - \bar{F}_2^r, \quad \bar{F}_3 = m_{o3} \bar{W}_{c3} + P_3 \bar{y} - \delta_3 \bar{F}_3^r.$$

Этап 4. ПКП(2) активная, т. е. со стороны корпуса (тела m_{o1}) на ногу (на тело m_{o2}) действует движущая сила

$$F_2 = \bar{p}_2 \cdot \bar{F}_2 = -\bar{x} \cdot (P_2 \bar{y} - \bar{F}_2^r) = \bar{x} \cdot \bar{F}_2^r = \bar{x} \cdot (F_{x2} \bar{x} + F_{y2} \bar{y}) = F_{x2}. \quad (26)$$

Этап 5. По формуле (13) выпишем векторное уравнение

$$\bar{F}_1 = \sum_{j=1}^3 m_{oj} \bar{W}_{cj} + P\bar{y} - \sum_{i=2}^3 \delta_i \bar{F}_i^r = 0, \quad (27)$$

где P – вес КШМ. Машина работает в вертикальной плоскости. Поэтому из векторного уравнения (27) с учетом равенств $\bar{y} \cdot \bar{W}_{cj} = 0$, $\bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj} \bar{W}_{cj} = m_{13} \ddot{q}_1$, где $m_{13} = m_{o1} + m_{o3}$ получим два скалярных уравнения (проекции на оси $O\bar{x}$, $O\bar{y}$)

$$\bar{x} \cdot \bar{F}_1 = m_{13} \ddot{q}_1 - F_{x2} + F_{x3} = 0, \quad \bar{y} \cdot \bar{F}_1 = P - F_{y2} - F_{y3} = 0. \quad (28)$$

Этап 6. Для ноги и колеса по формуле (14) выпишем

$$\bar{M}_2 = a_2 \bar{c}_2 \times (m_{o2} \bar{W}_{c2} + P_2 \bar{y}) + \bar{K}_{c2} - \delta_2 \bar{M}_2^r = a_2 \bar{y} \times P_2 \bar{y} = 0, \quad \bar{M}_3 = \bar{K}_{c3} - \bar{M}_3^r.$$

Этап 7. Колесо пассивное (ведомое), т. е. $M_3 = 0$. Следовательно, с учетом формул (6), (25)

$$M_3 = \bar{q}_3 \cdot \bar{M}_3 = \bar{z} \cdot \bar{K}_{c3} + R F_{x3} \bar{z} \cdot \bar{z} = I_3^c \ddot{\alpha}_3 + R F_{x3} = 0. \quad (29)$$

Этап 8. По формуле (17) с учетом равенств

$$\bar{W}_{c1} = \ddot{q}_1 \bar{x}, \quad \bar{K}_{c1} = 0, \quad \bar{R}_2 = -q_1 \bar{x} - R \bar{y}, \quad \bar{R}_3 = 0, \quad \bar{M}_2 = 0, \quad \bar{c}_1 = -\bar{x}$$

выпишем векторное уравнение

$$\bar{M}_1 = -a_1 P_1 \bar{x} \times \bar{y} + \sum_{k=2}^3 (\bar{R}_k \times \bar{F}_k + \bar{M}_k) = -a_1 P_1 \bar{z} + \bar{M}_3 - (q_1 \bar{x} + R \bar{y}) \times (P_2 \bar{y} - \bar{F}_2^r) = 0.$$

Проекция этого уравнения на ось $O\bar{z}$ с учетом равенств (24), (29) принимает вид

$$-a_1 P_1 - q_1 P_2 + I_3^c \ddot{\alpha}_3 + q_1 F_{y2} - R(F_{x2} - F_{x3}) = 0. \quad (30)$$

Этап 9. Из уравнений (28), (29), (30) получим

$$F_{x2} - F_{x3} = m_{13} \ddot{q}_1, \quad F_{y2} + F_{y3} = P, \quad F_{x3} = -I_3^c \ddot{\alpha}_3 / R, \\ -a_1 P_1 - q_1 P_2 + I_3^c \ddot{\alpha}_3 + q_1 F_{y2} = R(F_{x2} - F_{x3}) = R m_{13} \ddot{q}_1.$$

Отсюда

$$F_{x2} = m_{13} \ddot{q}_1 + F_{x3} = m_{13} \ddot{q}_1 - I_3^c \ddot{\alpha}_3 / R, \\ F_{y2} = (R m_{13} \ddot{q}_1 + a_1 P_1 + q_1 P_2 - I_3^c \ddot{\alpha}_3) / q_1, \quad F_{y3} = P - F_{y2}.$$

Теперь по формуле (26) получим искомую формулу вычисления движущей силы ноги

$$F_2 = F_{x2} = m_{13} \ddot{q}_1 - I_3^c \ddot{\alpha}_3 / R. \quad (31)$$

Условие реализации шага имеет вид $F_{x2} \leq f_0 F_{y2}$. Отсюда

$$m_{13} \ddot{q}_1 - I_3^c \ddot{\alpha}_3 / R \leq f_0 (R m_{13} \ddot{q}_1 + a_1 P_1 + q_1 P_2 - I_3^c \ddot{\alpha}_3) / q_1,$$

где $\ddot{q}_1 = -R \ddot{q}_3$, $\ddot{\alpha}_3 = -\ddot{q}_3$.

6. КШМ с полярной ногой

На рис. 8 изображена КШМ, корпус которой образует с ногой активную ПКП и пассивную ВКП с колесной парой. В отличие от КШМ на рис. 7 здесь корпус и нога меняют свою ориентацию в вертикальной плоскости.

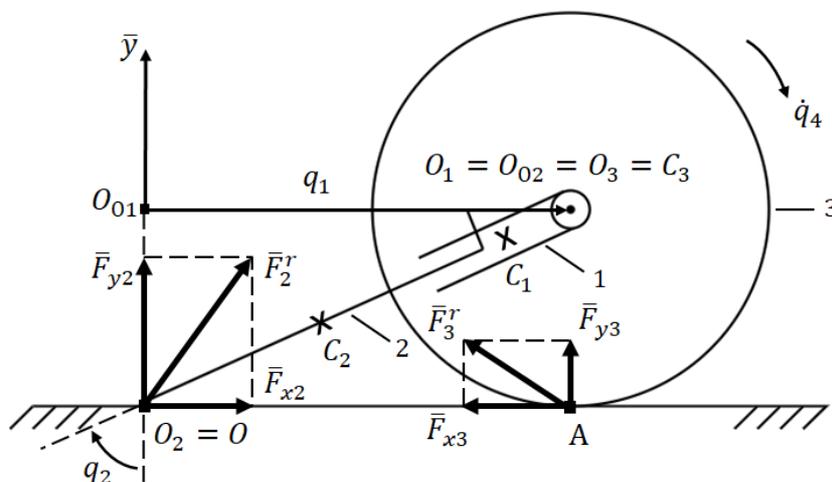


Рис. 8. Колесо-шагающая машина для моделирования одного шага
Fig. 8. A wheel-walking machine for single-step modeling

Этап 1. КШМ состоит из трех тел, т. е. $N = 3$, где m_{o1} – корпус в виде направляющей для ноги, m_{o2} – нога в виде стержня, m_{o3} – колесная пара (далее колесо).

Параметры относительного положения тел: $q_1 = O_{o1}O_1$ – положение полюса O_1 корпуса на оси $O\bar{x}$; q_2 – угол поворота корпуса вокруг оси $O_1\bar{z}$; $q_3 = O_{o2}O_2$ – положение опорной точки ноги относительно полюса корпуса; q_4 – угол поворота колеса относительно корпуса. В исходном положении $q_1 = q_2 = q_4 = 0$, $q_3 = O_1A = R$.

$$a_3 = 0, \bar{p}_2 = -\bar{y}_2, \bar{q}_2 = \bar{q}_3 = \bar{z}, \bar{c}_1 = -\bar{y}_2, \bar{c}_2 = \bar{y}_2, \bar{c}_3 = 0, \\ \bar{R}_2 = \overline{O_1O_2} = -q_1\bar{x} - R\bar{y}, \bar{R}_3 = \overline{O_1O_3} = 0.$$

Этап 2. Мысленно разорванные связи ноги и колеса с ОП в точках O_2 и A заменим реакциями \bar{F}_j^r, \bar{M}_j^r , где $j = 2, 3$,

$$\bar{F}_2^r = F_{x2}\bar{x} + F_{y2}\bar{y}, \bar{M}_2^r = 0, \bar{F}_3^r = -F_{x3}\bar{x} + F_{y3}\bar{y}, \bar{M}_3^r = -RF_{x3}\bar{z}. \quad (32)$$

Этап 3. Для ноги по формуле (10) выпишем

$$\bar{F}_2 = m_{o2}\bar{W}_{c2} + P_2\bar{y} - \bar{F}_2^r. \quad (33)$$

Для колеса по формуле (10) выпишем $\bar{F}_3 = m_{o3}\bar{W}_{c3} + P_3\bar{y} - \bar{F}_3^r$.

Этап 4. ПКП(2) активная. Формула вычисления движущей силы имеет вид

$$F_2 = \bar{p}_2 \cdot \bar{F}_2 = -\bar{y}_2 \cdot (m_{o2}\bar{W}_{c2} + P_2\bar{y} - \bar{F}_2^r) = -m_{o2}\bar{y}_2 \cdot \bar{W}_{c2} - P_2\bar{y}_2 \cdot \bar{y} + \bar{y}_2 \cdot (F_{x2}\bar{x} + F_{y2}\bar{y}),$$

т. е.

$$F_2 = W_2^p + x_{y2}F_{x2} + y_{y2}F_{y2}, \quad (34)$$

где $W_2^p = -m_{o2}\bar{y}_2 \cdot \bar{W}_{c2} - P_2y_{y2}$, $x_{y2} = \bar{y}_2 \cdot \bar{x}$, $y_{y2} = \bar{y}_2 \cdot \bar{y}$.

Этап 5. По формуле (13) выпишем $\bar{F}_1 = \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + P\bar{y} - \sum_{i=2}^3 \bar{F}_i^r = 0$, где P – вес машины. Из этого векторного уравнения получим два скалярных уравнения в проекциях на оси $O\bar{x}$, $O\bar{y}$
 $\bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} - F_{x2} + F_{x3} = 0$, $\bar{y} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + P - F_{y2} - F_{y3} = 0$. (35)

Этап 6. Для концевых тел по формуле (14) выпишем

$$\bar{M}_2 = a_2\bar{c}_2 \times (m_{o2}\bar{W}_{c2} + P_2\bar{y}) + \bar{K}_{c2}, \bar{M}_3 = \bar{K}_{c3} - \bar{M}_3^r. \quad (36)$$

Этап 7. ВКП пассивная. Тогда по аналогии с этапом 7 предшествующей задачи получим $F_{x3} = -I_3^c\ddot{\alpha}_3/R$.

Этап 8. По формуле (17) с учетом (33), (36) и равенства $\bar{R}_3 = 0$ выпишем

$$\bar{M}_1 = a_1\bar{c}_1 \times (m_{o1}\bar{W}_{c1} + P_1\bar{y}) + \bar{K}_{c1} + \bar{R}_2 \times \bar{F}_2 + \bar{M}_2 + \bar{M}_3 = \bar{W}_c - \bar{R}_2 \times \bar{F}_2^r - \bar{M}_3^r = 0, \quad (37)$$

где $\bar{W}_c = \sum_{j=1}^3 [a_j\bar{c}_j \times (m_{oj}\bar{W}_{cj} + P_j\bar{y}) + \bar{K}_{cj} + \bar{K}_{c3} + \bar{R}_2 \times (m_{o2}\bar{W}_{c2} + P_2\bar{y})]$. Проекция уравнения (37) на ось $O_1\bar{z}$ с учетом равенств (32) принимает вид

$$\bar{z} \cdot \bar{W}_c - \bar{R}_2 \times (F_{x2}\bar{x} + F_{y2}\bar{y}) \cdot \bar{z} + RF_{x3} = \bar{z} \cdot \bar{W}_c + \bar{R}_2 \cdot (F_{x2}\bar{y} - F_{y2}\bar{x}) + RF_{x3} = 0, \quad (38)$$

где $\bar{R}_2 \cdot (F_{x2}\bar{y} - F_{y2}\bar{x}) = -(q_1\bar{x} + R\bar{y}) \cdot (F_{x2}\bar{y} - F_{y2}\bar{x}) = q_1F_{y2} - RF_{x2}$.

Этап 9. Из уравнений (35), (38) и выражения $F_{x3} = -I_3^c\ddot{\alpha}_3/R$ получим

$$F_{x2} - F_{x3} = F_{x2} - I_3^c\ddot{\alpha}_3/R = W_x, \quad F_{y2} + F_{y3} = W_y^p, \\ RF_{x3} + q_1F_{y2} - RF_{x2} = -I_3^c\ddot{\alpha}_3 + q_1F_{y2} - RF_{x2} = W_z,$$

где $W_x = \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj}$, $W_y^p = \bar{y} \cdot \sum_{j=1}^3 m_{oj}\bar{W}_{cj} + P$, $W_z = -\bar{z} \cdot \bar{W}_c$. Отсюда

$$F_{x2} = W_x + I_3^c\ddot{\alpha}_3/R, \quad F_{y2} = (W_z + I_3^c\ddot{\alpha}_3 + RF_{x2})/q_1 = [W_z + I_3^c\ddot{\alpha}_3 + R(W_x + I_3^c\ddot{\alpha}_3/R)]/q_1.$$

Следовательно, согласно (34) искомая движущая сила вычисляется по формуле

$$F_2 = W_2^p + x_{y2}F_{x2} + y_{y2}F_{y2} = W_2^p + x_{y2}(W_x + I_3^c\ddot{\alpha}_3/R) + y_{y2}(W_z + RW_x + 2I_3^c\ddot{\alpha}_3)/q_1.$$

Условие реализации шага имеет вид $F_{x2} \leq f_oF_{y2}$, т. е.

$$W_x + I_3^c\ddot{\alpha}_3/R \leq f_o(W_z + RW_x + 2I_3^c\ddot{\alpha}_3)/q_1.$$

7. Решение первой задачи динамики ШМ с управляемой длиной ноги

Рассмотрим двухногую ШМ в двухопорном состоянии (рис. 9), в которой первое тело ноги образует ВКП с корпусом, второе тело с первым образует ПКП. Рассматриваемая модель ШМ предназначена для исследования условий реализации одного шага без учета динамики переносных ног.

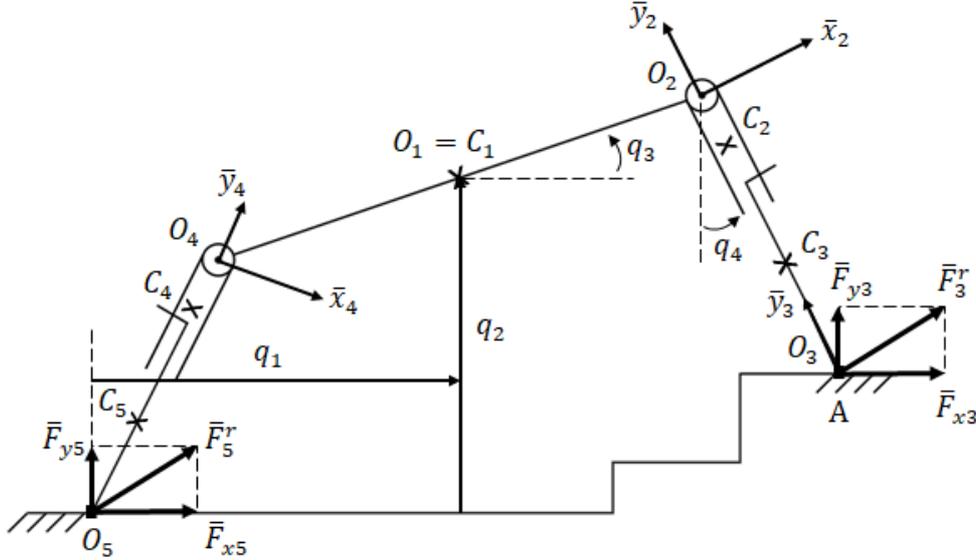


Рис. 9. Шагающая машина для моделирования одного шага и условий его реализации
Fig. 9. A walking machine for modeling a single step and its implementation conditions

Этап 1. ШМ состоит из следующих тел: m_{o1} – корпус; m_{o2}, m_{o3} – тела передней опорной ноги; m_{o4}, m_{o5} – тела задней опорной ноги. В исходном положении тел оси $O_i\bar{x}_i\bar{y}_i\bar{z}_i$ их ССК параллельны ортам $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$.

Через O_i обозначен полюс второго тела m_{oi} рассматриваемой ноги, т. е. $i \in \{3,5\}$. O_{i-1} – полюс первого тела рассматриваемой ноги. $\bar{R}_i = \overline{O_{i-1}O_i} = -L_{qi}\bar{y}_i$, L_{qi} – длина ноги с опорной точкой O_i . Далее используются следующие параметры:

$$N = 5, O_1 = C_1, a_1 = 0, \delta_3 = \delta_5 = 1, \bar{p}_i = -\bar{y}_i, \bar{q}_{i-1} = \bar{z}_{i-1}, \bar{c}_i = \bar{y}_i, \bar{c}_{i-1} = -\bar{y}_i, \bar{c}_1 = 0.$$

Этап 2. Мысленно устраним связь опорных ног с ОП, заменив их реакциями

$$\bar{F}_i^r = F_{xi}\bar{x} + F_{yi}\bar{y}, \bar{M}_i^r = 0. \quad (39)$$

Здесь и далее $i \in N_o = \{3,5\}$ – множество номеров концевых тел опорных ног, F_{xi}, F_{yi} – проекции вектора \bar{F}_i^r на оси $O\bar{x}, O\bar{y}$ соответственно.

Этап 3. Для $i \in N_o$ по формуле (10) выпишем

$$\bar{F}_i = m_{oi}\bar{W}_{ci} + P_i\bar{y} - \bar{F}_i^r. \quad (40)$$

Для первых тел ног по формуле (11) выпишем

$$\bar{F}_{i-1} = \bar{W}_{i-1}^p - \bar{F}_i, \quad (41)$$

где $\bar{W}_{i-1}^p = \sum_{j=i-1}^i m_{oj}\bar{W}_{cj} + P_n\bar{y}$, $P_n = P_{i-1}^p$ – вес ноги.

Этап 4. Используя формулы (39), (40) для вычисления искомой движущей силы ПКП ноги, получим

$$F_i = \bar{p}_i \cdot \bar{F}_i = -\bar{y}_i \cdot (m_{oi}\bar{W}_{ci} + P_i\bar{y}) - \bar{F}_i^r = W_{yi}^p + F_{xi}x_{yi} + F_{yi}y_{yi}, \quad (42)$$

где $x_{yi} = \bar{x} \cdot \bar{y}_i$, $y_{yi} = \bar{y} \cdot \bar{y}_i$ – направляющие косинусы ноги в ССК ОП $O\bar{x}\bar{y}$,

$$W_{yi}^p = -\bar{y}_i \cdot (m_{oi}\bar{W}_{ci} + P_i\bar{y}).$$

Этап 5. Для корпуса по формуле (13) выпишем $\bar{F}_1 = \sum_{j=1}^N m_{oj}\bar{W}_{cj} + P\bar{y} - \sum_{i \in N_o} \bar{F}_i^r = 0$, где P – вес ШМ. Взяв проекции этого уравнения на оси $O\bar{x}, O\bar{y}$, получим

$$F_{x3} + F_{x5} = W_x, \quad F_{y3} + F_{y5} = W_y^p, \quad (43)$$

где $W_x = \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^N m_{oj}\bar{W}_{cj}$, $W_y^p = P + \bar{y} \cdot \sum_{j=1}^N m_{oj}\bar{W}_{cj}$.

Этап 6. Для первого тела ноги по формуле (15) с учетом равенства $\bar{R}_i = -L_{qi}\bar{y}_i$ выпишем

$$\bar{M}_{i-1} = \bar{W}_{i-1}^a + L_{qi}\bar{y}_i \times \bar{F}_i^r, \quad (44)$$

где $\bar{W}_{i-1}^a = \sum_{j=i-1}^i [a_j\bar{c}_j \times (m_{oj}\bar{W}_{cj} + P_j\bar{y}) + \bar{K}_{cj}] - L_{qi}\bar{y}_i \times (m_{oi}\bar{W}_{ci} + P_i\bar{y})$.

Этап 7. Из (44) с учетом равенств $\bar{q}_{i-1} = \bar{z}_{i-1} = \bar{z}_i$, $\bar{z}_{i-1} \times \bar{y}_i = -\bar{x}_i$ получим

$$M_{i-1} = \bar{q}_{i-1} \cdot \bar{M}_{i-1} = \bar{z}_{i-1} \cdot (\bar{W}_{i-1}^a + L_{qi}\bar{y}_i \times \bar{F}_i^r) = \bar{z}_{i-1} \cdot \bar{W}_{i-1}^a - L_{qi}\bar{x}_i \cdot \bar{F}_i^r.$$

Отсюда с учетом (39) и обозначения $W_{i-1}^z = \bar{z}_{i-1} \cdot \bar{W}_{i-1}^a$ формулы вычисления движущих моментов сил ВКП ноги принимают вид

$$M_{i-1} = W_{i-1}^z - L_{qi}\bar{x}_i \cdot \bar{F}_i^r = W_{i-1}^z - L_{qi}(F_{xi}x_{xi} + F_{yi}y_{xi}), \quad (45)$$

где $x_{xi} = \bar{x} \cdot \bar{x}_i$, $y_{xi} = \bar{y} \cdot \bar{x}_i$.

Этап 8. По формуле (17) с учетом равенств $a_1 = 0$, $\bar{M}_1^r = 0$ выпишем векторное уравнение

$$\bar{M}_1 = \bar{K}_{c1} + \sum_{k \in S_1} (\bar{R}_k \times \bar{F}_k + \bar{M}_k) = \bar{K}_{c1} + \sum_{i \in N_o} (\bar{R}_{i-1} \times \bar{F}_{i-1} + \bar{M}_{i-1}) = 0$$

и запишем его проекции на ось $O\bar{z}$. Для этого представим вектор \bar{R}_{i-1} в виде $\bar{R}_{i-1} = L_{i-1}\bar{x}_1$, где L_{i-1} – координата на оси $O_1\bar{x}_1$ точки O_{i-1} подвеса ноги к корпусу. Тогда с учетом (41), (44) получим

$$\bar{M}_1 = \bar{K}_{c1} + \sum_{i \in N_o} [L_{i-1}\bar{x}_1 \times (\bar{W}_{i-1}^p - \bar{F}_i^r) + \bar{W}_{i-1}^a + L_{qi}\bar{y}_i \times \bar{F}_i^r] = 0,$$

т. е.

$$\bar{M}_1 = \bar{K} + \sum_{i \in N_o} (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \times \bar{F}_i^r = 0, \quad (46)$$

где $\bar{K} = \bar{K}_{c1} + \sum_{i \in N_o} [L_{i-1}\bar{x}_1 \times \bar{W}_{i-1}^p + \bar{W}_{i-1}^a]$. Проекция уравнения (46) на ось $O\bar{z}$ с учетом (39) имеет вид

$$\bar{z} \cdot \bar{M}_1 = \bar{z} \cdot \bar{K} + \sum_{i \in N_o} (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \times (F_{xi}\bar{x} + F_{yi}\bar{y}) \cdot \bar{z} = 0.$$

Отсюда получим скалярное уравнение

$$\sum_{i \in N_o} (L_{qi}^x F_{xi} + L_{qi}^y F_{yi}) = \dot{K}, \quad (47)$$

где $\dot{K} = -\bar{z} \cdot \bar{K}$,

$$L_{qi}^x = (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \times \bar{x} \cdot \bar{z} = (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \cdot (-\bar{y}) = L_{i-1}y_{x1} - L_{qi}y_{yi},$$

$$L_{qi}^y = (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \times \bar{y} \cdot \bar{z} = (L_{qi}\bar{y}_i - L_{i-1}\bar{x}_1) \cdot \bar{x} = L_{qi}x_{yi} - L_{i-1}x_{x1},$$

$$y_{x1} = \bar{y} \cdot \bar{x}_1, x_{x1} = \bar{x} \cdot \bar{x}_1 - \text{направляющие косинусы корпуса в ССК ОП } O\bar{x}\bar{y}.$$

Этап 9. Для вычисления динамических реакций F_{x3} , F_{y3} , F_{x5} , F_{y5} в точках O_3 и O_5 имеем два уравнения (43) и уравнение (47), из которых получим

$$F_{x3} = W_x - F_{x5}, \quad F_{y3} = W_y^p - F_{y5}, \quad (48)$$

$$L_{q3}^x F_{x3} + L_{q3}^y F_{y3} + L_{q5}^x F_{x5} + L_{q5}^y F_{y5} = L_{q3}^x (W_x - F_{x5}) + L_{q3}^y (W_y^p - F_{y5}) + L_{q5}^x F_{x5} + L_{q5}^y F_{y5} = \\ = L_{q3}^x W_x + L_{q3}^y W_y^p + (L_{q5}^x - L_{q3}^x) F_{x5} + (L_{q5}^y - L_{q3}^y) F_{y5} = \dot{K}.$$

Из последнего уравнения с использованием обозначений

$$L_{xq} = L_{q5}^x - L_{q3}^x, \quad L_{yq} = L_{q5}^y - L_{q3}^y, \quad W_a = \dot{K} - L_{q3}^x W_x - L_{q3}^y W_y^p$$

получим одно линейное уравнение с двумя неизвестными реакциями

$$L_{xq} F_{x5} + L_{yq} F_{y5} = W_a. \quad (49)$$

Недостающее уравнение можно получить несколькими способами. Здесь рассмотрим два из них. Первый связан с использованием модели Кулона (7).

С учетом модели Кулона $F_{x5} = fF_{y5}$, $F_{x5} \leq f_o F_{y5}$ уравнение (49) примет вид

$$(fL_{xq} + L_{yq})F_{y5} = W_a. \quad (50)$$

Отсюда для вычисления динамической реакции F_{y5} получим искомую формулу

$$F_{y5} = W_a / (fL_{xq} + L_{yq}). \quad (51)$$

Остальные динамические реакции вычисляются по формулам (48). По формулам (42), (45) вычисляются искомые движущие силы и моменты сил в КП ног, т. е. последовательность расчетных формул имеет вид

$$F_{y5} = W_a / (fL_{xq} + L_{yq}), \quad F_{y3} = W_y^p - F_{y5}, \quad F_{x5} = fF_{y5}, \quad F_{x3} = W_x - fF_{y5},$$

$$F_3 = W_{y3}^p + x_{y3}F_{x3} + y_{y3}F_{y3}, \quad F_5 = W_{y5}^p + x_{y5}F_{x5} + y_{y5}F_{y5},$$

$$M_2 = W_2^z - L_{q3}(x_{x3}F_{x3} + y_{x3}F_{y3}), \quad M_4 = W_4^z - L_{q5}(x_{x5}F_{x5} + y_{x5}F_{y5}).$$

Для реализации шага без проскальзывания ноги относительно ОП в точке O_5 необходимо выполнить условие

$$F_{x5} = W_x - F_{x3} = W_x - fF_{y3} \leq f_o F_{y5} = f_o (W_y^p - F_{y3}),$$

т. е. $W_x - f_o W_y^p \leq (f - f_o) F_{y3} = (f - f_o)(W_y^p - F_{y5}) = f W_y^p - f_o W_y^p - (f - f_o) F_{y5}$. Отсюда первое искомое условие реализации шага имеет вид

$$W_x - f W_y^p \leq (f_o - f) F_{y5}. \quad (52)$$

Для реализации шага без проскальзывания ноги относительно ОП в точке O_3 необходимо выполнить условие $F_{x3} = W_x - F_{x5} = W_x - f F_{y5} \leq f_o F_{y3} = f_o (W_y^p - F_{y5})$.

Отсюда второе искомое условие реализации шага имеет вид

$$W_x - f_o W_y^p \leq (f - f_o) F_{y5}. \quad (53)$$

С целью верификации неравенств (52), (53) просуммируем их. Тогда получим

$$2W_x - (f + f_o) W_y^p \leq 0.$$

Отсюда имеем

$$W_x \leq (f + f_o) W_y^p / 2, \quad (54)$$

где по обозначению, принятому на этапе 5, $W_x = \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^N m_{oj} \bar{W}_{cj}$ – проекция на ось $O\bar{x}$ абсолютного ускорения ЦМ ШМ, $W_y^p = P + \bar{y} \cdot \sum_{j=1}^N m_{oj} \bar{W}_{cj}$ – сумма веса ШМ и проекции на ось $O\bar{y}$ абсолютного ускорения ЦМ ШМ. Можно считать, что $(f + f_o)/2$ – усредненный коэффициент трения скольжения. Таким образом, неравенство (54) соответствует модели Кулона для движения ЦМ ШМ под действием сил трения, действующих на ноги.

Для применения второго способа необходимо, чтобы приводы ВКП имели обратимые редукторы. Тогда, отключив один из двух приводов, например, привод ВКП(4), получим согласно (45) $M_4 = W_4^z - L_{q5}(x_{x5} F_{x5} + y_{x5} F_{y5}) = 0$. Теперь вместе с уравнением (49) для вычисления двух динамических реакций имеем два уравнения, что и требуется для снятия неопределенности. Фактически так снимается неопределенность в распределении движущих моментов сил между приводами ВКП двух ног. Конечно, если мощности привода одной ВКП недостаточно для реализации рассматриваемого шага, то второй способ снятия неопределенности невозможен.

Заключение

В статье описан формализм решения первой задачи динамики ШМ, т. е. вычисления движущих сил и моментов сил в КП ног, обеспечивающих заданное движение корпуса и ему соответствующее движение опорных и переносных ног, где опорные ноги не проскальзывают относительно ОП. Расчет вновь создаваемых конструкций различных управляемых машин начинается с решения первой задачи динамики. Затем решают вторую задачу динамики и различные задачи управления ходьбой. Поэтому важно безошибочно и максимально точно решать именно первую задачу динамики, например, не ограничиваться моделями ШМ с ногами, массы которых сосредоточены в точках их подвеса к корпусу. Важно также верифицировать все расчетные формулы. Аналитическую верификацию мы продемонстрировали на последнем примере. Многочисленные примеры численной верификации формул приведены в учебном пособии [13].

Список литературы

1. Шагающие машины / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, А.А. Кирильченко, В.В. Лапшин. М.: Ин-т прикл. математики им. М.В. Келдыша АН СССР, 1989. 36 с. (Препринт № 87)
2. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин. М.: Ин-т прикл. математики им. М.В. Келдыша РАН, 2013. 32 с. (Препринт № 101) URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.
3. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем // Молодой ученый. 2015. № 18 (98). С. 207–215.
4. Метод проектирования пространственных древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов / А.К. Ковальчук, Д.Б. Кулаков, С.Е. Семенов и др. // Инженерный вестник. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 6–10. URL: <http://ainjournal.ru/doc/736600.html>.
5. Ковальчук А.К. Модифицированная система координат Денавита – Хартенберга для исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 12–30. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html>. DOI: 10.7463/1115.0826673
6. Разработка военных мобильных роботов в США / С.А. Безбогов, А.А. Кирильченко,

В.Е. Пряничников и др. Ин-т прикл. математики им. М.В. Келдыша АН СССР, 1994. 36 с. (Препринт № 11)

7. Охотимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 312 с.

8. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 541 с.

9. Vukobratović M., Stepanenko J. On the Stability of Anthropomorphic Systems // Bellman Prize in Mathematical Biosciences. 1972. Vol. 15, iss. 1-2. P. 1–37. DOI: 10.1016/0025-5564(72)90061-2

10. Evaluation of a Legged Mechanism Model and Control System of its Movement / E.A. Devyanin, A.V. Lenskii et al. // Proc. 5th Symp. on Automatic Control in Space. Genova, 1973.

11. Zielinska T., Heng K.H. Development of walking machine: Mechanical design and control problems // Mechatronics: The Science of Intelligent Machines. 2002. Vol. 12, no. 5. P. 737–754.

12. Longo D., Muscato G., Tarantello G. Performance Evaluation of Electrostatic Adhesion for Climbing Rolots // CLAWAR 2010: 13th International Conference on Climbing and Walking Rolots and the Support Technologies for Mobile Machines, Nagoya, Japan, 31 August – 03 September 2010. P. 1195–1201.

13. Телегин А.И. Основы теоретической механики систем тел. С приложениями в робототехнике: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 252 с.

14. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: учеб. для машиностроит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1983. 575 с.

15. Озол О.Г. Теория механизмов и машин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 432 с.

References

1. Okhotsimskiy D.E., Platonov A.K., Kirilchenko A.A., Lapshin V.V. *Shagayushchie mashiny* [Walking machines]. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences; 1989. 36 p. (Preprint No. 87) (In Russ.)

2. Pavlovskiy V.E. *O razrabotkakh shagayushchikh mashin* [On the development of walking machines]. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences; 2013. 32 p. (Preprint No. 101) (In Russ.). URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.

3. Fokin V.G., Shanygin S.V. [Review and prospects of development of mobile walking robotic systems]. *Young Scientist*. 2015;18(98):207–215. (In Russ.)

4. Kovalchuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V., Vereykin A.A., Kulakov B.B., Karginov L.A. [Design method for spatial tree-like actuators of walking robots]. *Engineering Bulletin. Electron. journal*. 2014;11:6–10. (In Russ.) Available at: <http://ainjournal.ru/doc/736600.html>.

5. Kovalchuk A.K. Modified Denavit-Hartenberg coordinate system for the executive mechanisms of the robots with a tree-like kinematic structure. *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2015;(11):12–30. (In Russ.) DOI: 10.7463/1115.0826673

6. Bezbogov S.A., Kirilchenko A.A., Pryanichnikov V.E., Stepanov Yu.I. Trubitsyn O.N. *Razrabotka voennykh mobil'nykh robotov v SSHA* [Development of Military Mobile Robots in the USA]. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences; 1994. 36 p. (Preprint No. 11) (In Russ.)

7. Okhotsimskiy D.E., Golubev Yu.F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagayushchego apparata* [Mechanics and motion control of automatic walking apparatus]. Moscow: Nauka. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1984. 312 p. (In Russ.)

8. Vukobratovic M. *Shagayushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy* [Walking robots and anthropomorphic mechanisms]. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1976. 541 p. (In Russ.)

9. Vukobratović M., Stepanenko J. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Bellman Prize in Mathematical Biosciences*. 1972;15(1-2):1–37. DOI: 10.1016/0025-5564(72)90061-2

10. Devyanin E.A., Lenskii A.V. et al. Evaluation of a Legged Mechanism Model and Control System of its Movement. In: *Proc. 5th Symp. on Automatic Control in Space*. Genova; 1973.

11. Zielinska T., Heng K.H. Development of walking machine: Mechanical design and control problems. *Mechatronics: The Science of Intelligent Machines*. 2002;12(5):737–754.

12. Longo D., Muscato G., Tarantello G. Performance Evaluation of Electrostatic Adhesion for Climbing Rolots. In: *CLAWAR 2010: 13th International Conference on Climbing and Walking Rolots*

and the Support Technologies for Mobile Machines, Nagoya, Japan, 31 August – 03 September 2010. P. 1195–1201.

13. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan; 2023. 252 p. (In Russ.)

14. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki: ucheb. dlya mashinostroit. spets. vuzov* [Course of theoretical mechanics: Textbook for machine-building specialties of universities]. Moscow: Vysshaya shkola; 1983. 575 p. (In Russ.)

15. Ozol O.G. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1984. 432 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Телегин Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры автоматизи, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; teleginai@susu.ru.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusevev@susu.ru.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Information about the authors

Aleksandr I. Telegin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; teleginai@susu.ru.

Evgeny V. Gusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusevev@susu.ru.

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 16.02.2024

The article was submitted 16.02.2024

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 51-74, 789.012
DOI: 10.14529/ctcr240205

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЧАСТОТЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА ПО СПЕКТРУ С НИЗКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Л.С. Казаринов, kazarinovls@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6308-4596>

З.А. Колосова, kolosovaza@susu.ru

В.В. Абдуллин, abdullinvv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0992-5539>

Д.А. Шнайдер, shnayderda@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7275-6569>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы получения точной частоты спектральной компоненты из спектра сигнала с недостаточным разрешением с целью выяснения точности и применимости описываемых методов. Приведены основные принципы и последовательность действий для реализации параболической интерполяции и частотной демодуляции. Указанные методы применены к синтезированному сигналу, содержащему частотную компоненту, которую не удастся непосредственным образом определить по спектру с низким разрешением. Рассмотренные методы различаются по сложности вычислений и точности полученных результатов. Сделан вывод о применимости рассмотренных методов для различных задач вибродиагностики. **Цель исследования.** В данной статье рассматриваются методы получения точной частоты спектральной компоненты из спектра сигнала с недостаточным разрешением. Целью исследования является выяснение точности и применимости описываемых методов. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели были использованы следующие методы: параболическая интерполяция и частотная демодуляция. В статье приведены основные принципы и последовательность действий для реализации этих методов. Для проверки эффективности использованных методов был синтезирован сигнал, содержащий частотную компоненту, которую не удастся непосредственным образом определить по спектру с низким разрешением. **Результаты.** Методы параболической интерполяции и частотной демодуляции были применены к синтезированному сигналу. Результаты показали, что указанные методы позволяют получать точные значения частоты спектральной компоненты даже при низком разрешении спектра. Рассмотренные методы различаются по сложности вычислений и точности полученных результатов. **Заключение.** На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что методы параболической интерполяции и частотной демодуляции являются эффективными для получения точной частоты спектральной компоненты из спектра сигнала с недостаточным разрешением. Результаты исследования могут быть использованы в различных задачах вибродиагностики. В заключении сделано замечание о том, что выбор конкретного метода зависит от сложности вычислений и требуемой точности результатов.

Ключевые слова: спектр, преобразование Фурье, преобразование Гильберта, интерполяция, уточнение частоты

Для цитирования: Подход к оценке частоты спектральной составляющей цифрового сигнала по спектру с низким разрешением / Л.С. Казаринов, З.А. Колосова, В.В. Абдуллин, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 56–64. DOI: 10.14529/ctcr240205

AN APPROACH TO ESTIMATING THE FREQUENCY OF SPECTRAL COMPONENT BY LOW-RESOLUTION SPECTRUM OF DIGITAL SIGNAL

L.S. Kazarinov, kazarinovls@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6308-4596>

Z.A. Kolosova, kolosovaza@susu.ru

V.V. Abdullin, abdullinvv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0992-5539>

D.A. Shnayder, shnayderda@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7275-6569>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper examines certain methods of obtaining the exact frequency of the spectral component from the signal spectrum with insufficient resolution in order to clarify the accuracy of these methods and their applicability. The basic principles and the sequence of actions are given for the implementation of parabolic interpolation and frequency demodulation. These methods are applied to a synthesized signal containing a frequency component that cannot be determined directly from a low-resolution spectrum. The methods considered differ in the complexity of calculations and the accuracy of the results obtained. An introduction is made about the applicability of the considered methods for various tasks of vibration diagnostics. **Purpose of the study.** The article examines methods for obtaining an accurate frequency of a spectral component from a signal spectrum with insufficient resolution. The aim of the study is to determine the accuracy and applicability of the described methods. **Materials and methods.** The following methods were used to achieve the stated goal: parabolic interpolation and frequency demodulation. The article presents the basic principles and sequence of actions for implementing these methods. To verify the effectiveness of the used methods, a signal was synthesized containing a frequency component that cannot be directly determined from a low-resolution spectrum. **Results.** The methods of parabolic interpolation and frequency demodulation were applied to the synthesized signal. The results showed that the specified methods allow obtaining accurate values of the frequency of the spectral component even at low spectrum resolution. The considered methods differ in computational complexity and the accuracy of the obtained results. **Conclusion.** Based on the conducted research, it can be concluded that the methods of parabolic interpolation and frequency demodulation are effective for obtaining an accurate frequency of a spectral component from a signal spectrum with insufficient resolution. The results of the study can be used in various vibration diagnostics tasks. The conclusion notes that the choice of a specific method depends on the complexity of the calculations and the required accuracy of the results.

Keywords: spectrum, Fourier transform, Hilbert transform, interpolation, frequency estimation

For citation: Kazarinov L.S., Kolosova Z.A., Abdullin V.V., Shnayder D.A. An approach to estimating the frequency of spectral component by low-resolution spectrum of digital signal. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):56–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240205

Введение

Спектральное представление $X(f)$ сигнала $x(t)$, получаемое с использованием преобразования Фурье, получило широкое распространение в сфере вибрационной диагностики оборудования и является базовым инструментом для дальнейшей обработки и анализа сигналов вибрации, полученных с первичных измерительных преобразователей [1]. В идеальном случае i -я периодическая компонента сигнала $x(t)$ отображается на спектре соответствующей линией (точкой на графике), абсцисса которой равна частоте компоненты f_i , а ордината – амплитуде X_{f_i} [2]. В реальных условиях спектр сигнала имеет конечное разрешение по частоте df , из-за которого энергия периодической компоненты будет распределена между несколькими соседними линиями (точками) в окрестности x_i (рис. 1). Данное явление известно как растекание спектра [3]. В результате частота f_k наибольшей по амплитуде линии в окрестности x_i не равна частоте f_i спектральной компоненты, а амплитуда X_{f_k} данной точки не будет равна амплитуде X_{f_i} данной спектральной компоненты. Ошибка $|f_i - f_k|$ достигает своего максимального значения, равного $df/2$, при равных амплитудах X_{f_k} и $X_{f_{k+1}}$.

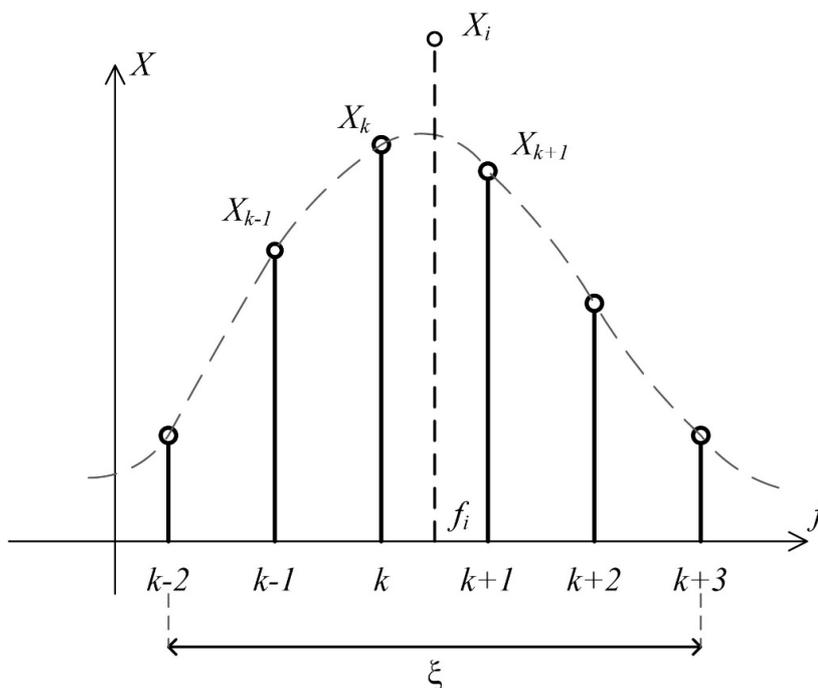


Рис. 1. Спектральная компонента на графике спектра сигнала
 Fig. 1. Spectral component on the signal spectrum graph

При этом существует ряд задач вибродиагностики, для решения которых необходимо знать частоту спектральной компоненты сигнала с высокой точностью: для детектирования дефектов ротора требуется точное значение частоты вращения, а для детектирования дефектов подшипника качения нужны точные значения их характерных частот (частоты перекачивания тел качения по внутреннему и внешнему кольцам, частота сепаратора и т. д.), которые, в свою очередь, также зависят от частоты вращения [4–6].

1. Разрешение спектра по частоте

Спектр сигнала позволяет представить сигнал в виде совокупности его частотных составляющих с информацией об их амплитуде и фазе. Важный параметр спектра – разрешение по частоте df , фактически являющееся расстоянием в герцах между двумя соседними линиями спектра.

Алгоритмы преобразования Фурье относятся к анализу в диапазоне частот от 0 до частоты Найквиста. Разрешение в таком случае определяется количеством спектральных линий в этом диапазоне [7]. Таким образом, df определяет, насколько точно можно оценить частоту составляющих сигнала.

Также разрешение спектра связано с длительностью интервала наблюдения [8, 9]:

$$df = 1/\tau = 1/(L/F_S) = F_S/L, \quad (1)$$

где τ – длительность сигнала в секундах; F_S – частота дискретизации; L – количество отсчетов в сигнале (согласно теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона [10]). Таким образом, естественный способ увеличить разрешение спектра – увеличить длительность анализируемого сигнала.

Рассмотрим это явление на примере простого гармонического сигнала [11], состоящего из двух синусоидальных компонент: 10 и 15 Гц с амплитудами 6 и 3 соответственно. Пусть частота дискретизации F_{S1} будет равна 16 000 Гц, а количество отсчетов в сигнале $L_1 = 32\,768$. Также рассмотрим спектры этого сигнала, уменьшив параметры F_{S1} и L_1 вдвое: $F_{S2} = F_{S1}/2$, $L_2 = L_1/2$. Построим 4 графика спектра этого сигнала (рис. 2), изменяя параметры количества отсчетов и частоты дискретизации.

Как следует из формулы (1), наилучшее разрешение было получено на том спектре, где F_S наименьшее, а L – наибольшее.

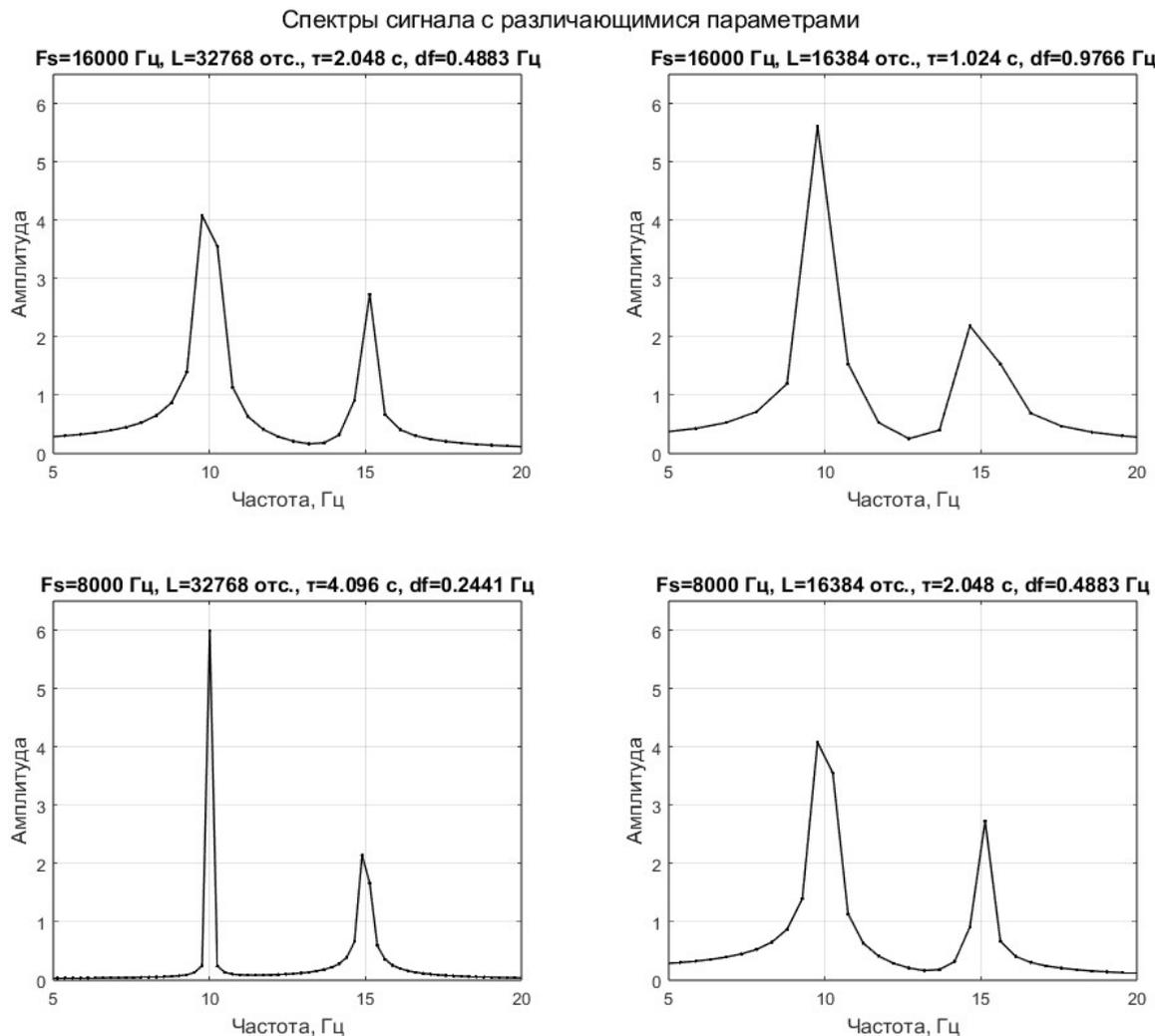


Рис. 2. Спектры гармонического сигнала с различающимися параметрами
Fig. 2. Harmonic signal spectra with different parameters

Параметры, влияющие на разрешение спектра, тесно связаны с возможностями измерительного прибора, записывающего сигнал [12]. Увеличение длительности записи сигнала приводит к увеличению расхода энергии, что может быть особенно критично для приборов с автономным батарейным питанием, и к росту объема передаваемых и хранимых данных [13]. Уменьшение частоты дискретизации, напротив, снижает объем данных при увеличении разрешения получаемого спектра, однако при этом пропорционально уменьшается максимальная детектируемая датчиком частота. На практике параметры F_s и L выбираются исходя из требуемого режима работы и характеристик измерительного прибора, в связи с чем уточненная оценка частоты спектральных компонент спектра с недостаточным разрешением является актуальной с практической точки зрения.

2. Методы уточнения частоты пика по спектру

Будем рассматривать нижеописанные методы на примере синтезированного гармонического сигнала:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (2)$$

где A – амплитуда сигнала; f – частота; φ – фаза. Выберем следующие параметры: $A = 0,5$; $f = 16,27$ Гц; $\varphi = 2/\pi$. Длительность сигнала пусть равняется 0,5 секунды. Частота дискретизации при построении спектра равна 16 000 Гц, количество отсчетов спектра – 32 000. Таким образом, шаг по частоте составляет 0,5 Гц. Временное представление сигнала и его спектр представлены на рис. 3.

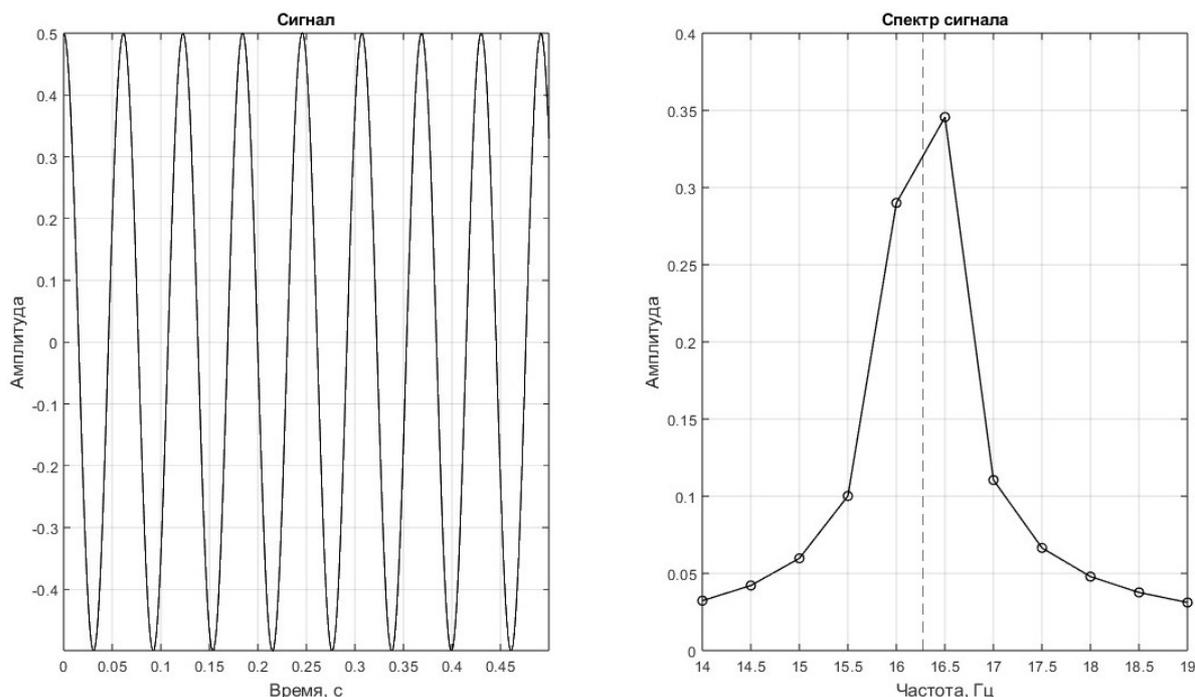


Рис. 3. Исследуемый гармонический сигнал с компонентой 16,27 Гц
 Fig. 3. The tested harmonic signal with a component of 16.27 Hz

2.1. Параболическая интерполяция

В случае, когда повышение разрешения всего спектра невозможно, можно прибегнуть к повышению разрешения его участка, взяв максимум и две соседние точки спектра (см. рис. 3) [14]. Тогда искомая частота спектра может быть найдена, даже если она расположена между двумя дискретными линиями спектра, путем вычисления максимальной абсциссы интерполяционной кривой пика дискретного спектра.

Точки спектра с координатами (16; 0,29), (16,5; 0,345) и (17; 0,11) примем за решения уравнения параболы. Подставив в уравнение координаты точек и решив систему уравнений, получаем оценочное значение f_i (абсциссу вершины параболы) (рис. 4) [15].

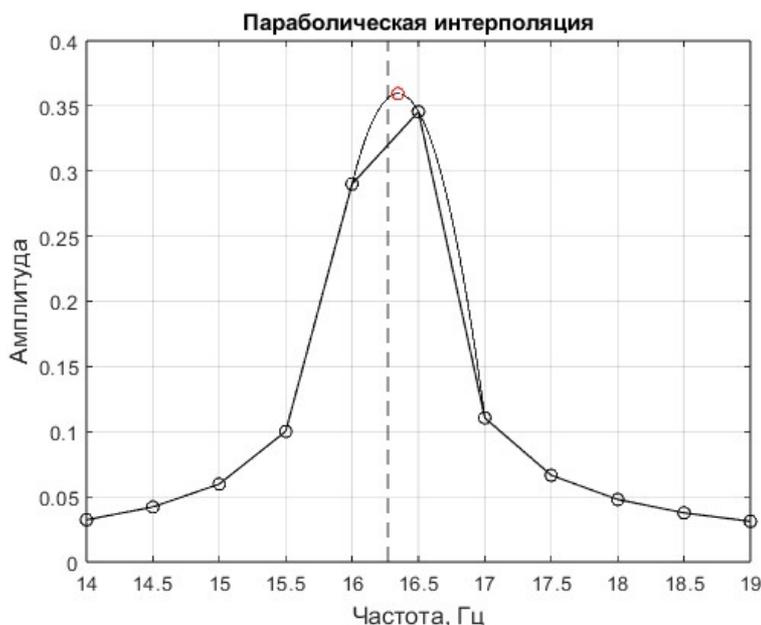


Рис. 4. Спектр исследуемого сигнала с выделенными узлами интерполяции
 Fig. 4. The spectrum of the tested signal with highlighted interpolation nodes

Значение частоты на вершине параболы равно 16,35 Гц. Отклонение от реального значения 16,27 Гц составляет 0,4645 %. Несмотря на достаточно высокое отклонение, следует отметить простоту и скорость выполнения данного метода, что является его главным достоинством.

2.2. Частотная демодуляция

Еще один метод уточнения частоты связан с частотной демодуляцией сигнала.

Предварительно из полного сигнала $x(t)$ нужно выделить модулированный сигнал $a(t)$ путем фильтрации в окрестностях интересующей частоты. Затем, согласно [16], определяем трансформанту Гильберта $\tilde{a}(t)$ для $a(t)$:

$$\tilde{a}(t) = \mathcal{H}\{a(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau. \quad (3)$$

Полученная трансформанта Гильберта связана с исходным модулированным сигналом $a(t)$ и аналитическим сигналом $\hat{a}(t)$ следующей формулой:

$$\hat{a}(t) = a(t) + j\tilde{a}(t). \quad (4)$$

Представим аналитический сигнал в виде

$$\hat{a}(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}. \quad (5)$$

Из (5) выделим составляющую фазовой модуляции $e^{j\varphi(t)}$ и устраним составляющую с несущей частотой f_0 путем умножения на $e^{-j2\pi f_0 t}$. Результирующая функция $\varphi(t) e^{-j2\pi f_0 t}$ является модулирующим по фазе сигналом, который, если выражен по модулю 2π , нуждается в дополнительной обработке для определения непрерывного сигнала $\varphi_m(t)$.

После получения непрерывного сигнала $\varphi_m(t)$ из него может быть получен модулирующий по частоте сигнал $f_m(t)$ по формуле

$$f_m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_m(t)}{dt}. \quad (6)$$

После выполнения описанного алгоритма получим вектор мгновенных частот $f_m(t)$, из которого можно получить частоту компоненты, применяя методы статистической обработки, к которым относятся среднее арифметическое, медиана, мода [17]. Применим вышеописанный алгоритм к сигналу, описанному в пункте 2.1. Получим вектор мгновенных частот, изображенный на рис. 5.

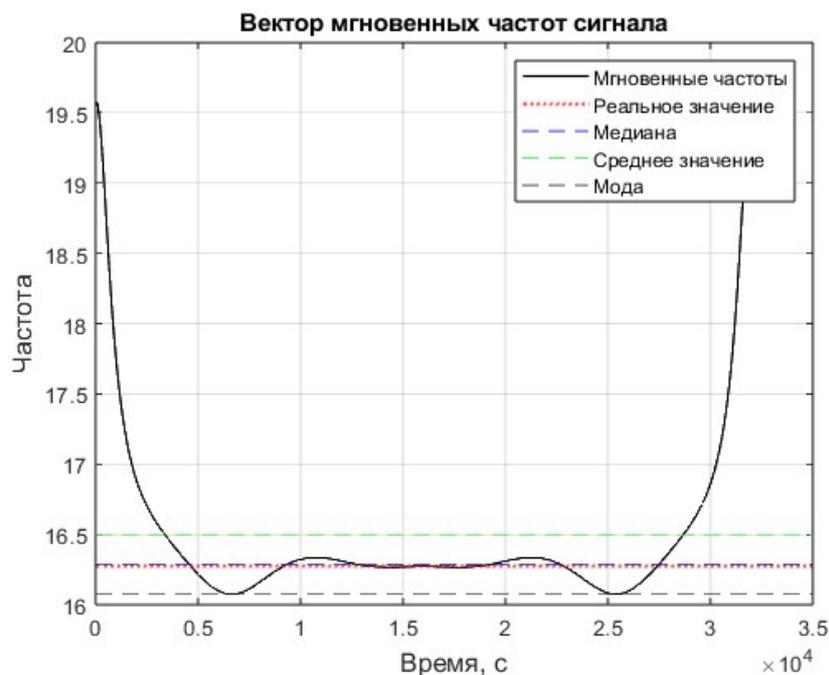


Рис. 5. Вектор мгновенных частот сигнала
Fig. 5. The vector of instantaneous signal frequencies

Красной пунктирной линией на графике отображено реальное значение частоты. Применим разные методы статистической обработки и занесем результаты в таблицу.

Полученные значения частоты
Obtained frequency values

Метод статистической обработки	Полученное значение, Гц	Отклонение, %
Среднее арифметическое	16,4999	1,4131
Мода	16,0743	1,2028
Медиана	16,2857	0,0965

Получение значения частоты из вектора мгновенных частот с помощью медианы показало наименьшее отклонение.

Недостатком вышеописанного метода является сложность выбора диапазона фильтрации для выделения модулированного сигнала: результат не будет соответствовать желаемой точности как в случае попадания в диапазон более одной компоненты сигнала, т. е. при избыточной ширине диапазона, так и в случае неполного попадания компоненты, т. е. при недостаточной ширине диапазона. Проблема выбора диапазона фильтрации для данного метода заслуживает отдельного рассмотрения.

При этом существенным преимуществом данного метода является высокая точность получаемого результата в сравнении с методами интерполяции. Его независимость от частоты дискретизации позволяет применять метод даже для спектров с существенно низким разрешением (df больше 0,5 Гц).

Заключение

Были рассмотрены и проверены на практике две группы методов уточнения частоты по спектру: основанных на интерполяции и на частотной демодуляции. По результатам проверки на смоделированном гармоническом сигнале можно сделать вывод о том, что метод параболической интерполяции легок в реализации, состоит из меньшего количества шагов и не требует сложных расчетов. Полученный данным методом результат оказался менее точным, его отклонение от реального значения частоты составило 0,4645 %. Более высокую точность показывает метод частотной демодуляции: при расчете частоты через медиану вектора мгновенных частот отклонение составило всего 0,0965 %. Однако он требует большего количества сложных расчетов.

Таким образом, в случаях, когда важна максимально возможная точность полученного значения частоты, следует применять метод частотной демодуляции, а в случаях, когда скорость и простота вычислений более важны, чем точность, например, при реализации концепции краевых вычислений (edge computing) с выполнением расчетов на борту интеллектуальных датчиков, следует применять параболическую интерполяцию.

В дальнейшей работе над методами уточнения частоты по спектру с недостаточным разрешением будут исследованы другие методы интерполяции, например, интерполяция с помощью формулы Гаусса. Также будет исследована возможность улучшения получаемых описанными методами результатов с помощью дополнения спектра нулями (zero-padding). В рамках продолжения исследований в области получения информации об отдельных частотных составляющих сложного сигнала планируется исследовать возможность получения точной амплитуды интересующей компоненты.

Список литературы/References

1. Абдуллин В.В., Рашупкина З.А., Шнайдер Д.А. Опыт внедрения системы вибромониторинга на клетки прокатного стана с применением технологии ПолиТЭР.ПоТ // Энергоресурсосбережение. Диагностика-2022. Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск: Мир Печати, 2022. С. 345–350. [Abdullin V.V., Rashchupkina Z.A., Shnayder D.A. [Implementation experience of a vibration monitoring system on a rolling mill cage using PolyTER.IIoT technology]. In: *Energoresursosberezhenie. Diagnostika-2022. Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Energy saving. Diagnostics-2022. Materials of the international scientific and practical conference]. Ulyanovsk: Mir Pechati, 2022. P. 345–350. (In Russ.)]
2. Goldman S. *Vibration spectrum analysis: a practical approach*. Industrial Press Inc., 1999. P. 27–37.
3. Lyon D.A. The discrete Fourier transform, part 4: spectral leakage. *Journal of object technology*. 2009;8(7):23–34. DOI: 10.5381/jot.2009.8.7.a3

4. Randall R.B., Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011;25:485–520. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.10.004
5. Rai A., Upadhyay S.H. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings. *Tribol. Int.* 2016;96:289–306. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.11.006
6. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mech. Syst. Signal Process.* 2006;20(7):1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.07.019
7. Rauscher C. *Fundamentals of spectrum analysis*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG; 2001. P. 19–28.
8. Bellini A., Yazidi A., Filippetti F. et al. High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(12):4200–4209. DOI: 10.1109/TIE.2008.2002685
9. Bellini A., Yazidi A., Filippetti F., Montelisciani G., Rossi C. High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008;55(12):4200–4209. DOI: 10.1109/TIE.2008.2002685
10. Por E., Kooten M. van, Sarkovic V. Nyquist–Shannon sampling theorem. *Leiden University*. 2019;1(1). DOI: 10.5334/jot.2019.1.1.a2
11. Brandt A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. New York, NY, USA: Wiley; 2011.
12. Liguori C., Paciello V., Paolillo A., Pietrosanto A. Improving and qualifying spectrum analysis made by digital scopes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007;56(6):2411–2419. DOI: 10.1109/TIM.2007.904742
13. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Khasanov A.R., Tselikanov D.F. IIoT-Based Approach to Industrial Equipment Condition Monitoring: Wireless Technology and Use Cases. In: *2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. 2020. P. 399–406. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267842
14. Gasior M., Gonzalez J.L. Improving FFT Frequency Measurement Resolution by Parabolic and Gaussian Spectrum Interpolation. *AIP Conference Proceedings*. 2004;732(1):276–285. DOI: 10.1063/1.1831158
15. Djukanović S., Popović T., Mitrović A. Precise sinusoid frequency estimation based on parabolic interpolation. In: *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818824
16. Randall R.B. *Frequency analysis*. Naerum (DK): Bruel & Kjaer; 1987.
17. Chiang C.L. *Statistical methods of analysis*. USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2003. P. 3–8. DOI: 10.5555/218623.218630

Информация об авторах

Казаринов Лев Сергеевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kazarinovls@susu.ru.

Колосова Зоя Александровна, преподаватель кафедры автоматике и управления, младший научный сотрудник лаборатории систем промышленной автоматизации и интернета вещей, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kolosovaza@susu.ru.

Абдуллин Вильдан Вильданович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; abdullinvv@susu.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматике и управления, руководитель лаборатории систем промышленной автоматизации и интернета вещей, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shnayderda@susu.ru.

Information about the authors

Lev S. Kazarinov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kazarinovls@susu.ru.

Zoya A. Kolosova, Lecturer of the Department of Automatics and Control, Junior Research Fellow of the Industrial Automation Systems and IoT Laboratory, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kolosovaza@susu.ru.

Vildan V. Abdullin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; abdullinvv@susu.ru.

Dmitry A. Shnayder, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automatics and Control, Director of the Industrial Automation Systems and IoT Laboratory, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shnayderda@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.08.2023
The article was submitted 18.08.2023

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 658.5 + 338.2
ББК 60.82
DOI: 10.14529/ctcr240206

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

И.З. Мустаев¹, *fermi_moustaev@mail.ru*

Н.К. Максимова², *natalia_02.78@mail.ru*

Д.И. Мустаева¹, *musssdiana@mail.ru*

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

² ПАО «ОДК-УМПО», Уфа, Россия

Аннотация. Инновационные проекты предполагают большое количество ресурсов и времени, необходимых для реализации и достижения требуемых параметров продукта. Известные методы экономической оценки эффективности проектов могут предоставить точный анализ на первые несколько лет, не учитывая все возможные факторы. Из-за важности как можно более точной постановки оценки эффективности для реализации инновационных проектов независимо от продолжительности используемые на данный момент методы недостаточно проработаны. Объём ресурсов, необходимый для создания инновационного проекта, может достигать таких уровней показателей, что существенным образом будет влиять на финансово-экономические показатели предприятия. Предложенный в статье новый метод, основанный на вычислении социофизического потенциала проекта, учитывает как экономические, так и неэкономические факторы независимо от продолжительности проекта. В отличие от других методик он учитывает параметры создаваемого продукта, что позволяет получить более корректные оценки и обеспечить правильное распределение ресурсов при реализации. Метод использования социофизического потенциала позволяет найти новый и более точный подход к оценке эффективности инновационных проектов. **Цель исследования.** В работе рассматривается вопрос сравнения оценки эффективности расчётов с использованием социофизических потенциалов и существующих подходов. Констатируется, что оценка эффективности должна учитывать разноплановые факторы качественного и количественного характера. На основании приведенного анализа существующих подходов делается вывод о том, что достоверность оценки является низкой. Невозможность правильной оценки приводит к сверхнормативным затратам, сопровождающим процессы разработки и эксплуатации продукта. **Материалы и методы.** Приводится модель оценки эффективности, базирующаяся на вычислении социофизического потенциала. Приводится модель социофизического потенциала. Описывается методика определения эффективности, применение которой описывается в сравнительном примере анализа выбора станка. **Результаты.** В связи со сложностью реализации инновационных проектов переход к оценке с помощью социофизического потенциала обеспечивает более эффективное распределение ресурсов для разработки проекта. Был предложен и обоснован метод использования социофизического потенциала для вычисления оценки эффективности инновационных проектов. **Заключение.** В заключение делается вывод о том, что для повышения эффективности нужно проводить оценку с использованием метода расчёта социофизических потенциалов, так как результаты обладают большей точностью в сравнении с известными методами.

Ключевые слова: инновация, инновационный проект, накопленный потенциал, социофизический объект, высокотехнологичный объект

Для цитирования: Мустаев И.З., Максимова Н.К., Мустаева Д.И. Рекомендации по оценке эффективности инновационных проектов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 65–75. DOI: 10.14529/ctcr240206

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240206

RECOMMENDATIONS FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE PROJECTS

I.Z. *Mustaev*¹, *fermi_moustaev@mail.ru*
N.K. *Maksimova*², *natalia_02.78@mail.ru*
D.I. *Mustaeva*¹, *musssdiana@mail.ru*

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

² PJSC "UEC-UMPO", Ufa, Russia

Abstract. Innovative projects involve a large amount of resources and time required to implement and achieve the required product parameters. Well-known methods of economic evaluation of the effectiveness of projects can provide an accurate analysis for the first few years, without taking into account all possible factors. Due to the importance of setting the effectiveness assessment as accurately as possible for the implementation of innovative projects, regardless of the duration, the methods currently used are insufficiently developed. The amount of resources required to create an innovative project can reach such levels of indicators, which will significantly affect the financial and economic performance of the enterprise. The proposed new method in the article, based on the calculation of the socio-physical potential of the project, takes into account both economic and non-economic factors, regardless of the duration of the project. Unlike other methods, it takes into account the parameters of the product being created, which allows you to get more correct estimates and ensure the correct allocation of resources during implementation. The method of using socio-physical potential allows us to find a new and more accurate approach to evaluating the effectiveness of innovative projects. **The purpose of the study.** The paper considers the issue of comparing the evaluation of the effectiveness of calculations using socio-physical potentials and existing approaches. It is stated that the effectiveness assessment should take into account diverse factors of a qualitative and quantitative nature. Based on the analysis of existing approaches, it is concluded that the reliability of the assessment is low. The inability to evaluate correctly leads to excessive costs that accompany the processes of product development and operation. **Materials and methods.** An efficiency assessment model based on the calculation of the socio-physical potential is presented. A model of the socio-physical potential is presented. The method of determining efficiency is described, the application of which is described in a comparative example of the analysis of the choice of the machine. **Results.** With the complexity of the implementation of innovative projects, the transition to assessment using socio-physical potential ensures a more efficient allocation of resources for project development. A method of using socio-physical potential for calculating the effectiveness of innovative projects was proposed and justified. **Conclusion.** In conclusion, it is concluded that in order to increase efficiency, it is necessary to carry out an assessment using the method of calculating socio-physical potentials, since the results are more accurate in comparison with known methods.

Keywords: innovation, innovative project, accumulated potential, sociophysical object, high-tech facility

For citation: Mustaev I.Z., Maksimova N.K., Mustaeva D.I. Recommendations for evaluating the effectiveness of innovative projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):65–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240206

Постановка задачи оценки эффективности инновационных проектов

Известные в настоящее время методы экономической оценки эффективности ограничены в применении к инновационным проектам создания высокотехнологичных изделий. Причинами являются длительность таких проектов, превышающая в ряде случаев десять лет, и неопределенность, связанная с ними. Необходимо подчеркнуть, что значимость точной оценки связана с возможной высокой стоимостью таких проектов и, как следствие, ответом на вопрос, каков будет уровень неэффективно использованных инвестиций. Уровень затрат иллюстрируется на примере сопоставления затрат на программу, связанную с созданием одного из высокотехнологичных изделий нового поколения, и суммарных затрат на инновации в РФ. Для примера: стоимость программы по созданию истребителя F-35 превышает \$1,3 трлн, или приблизительно 80 трлн руб. по курсу \$1 ≈ 60 руб. [1]; с другой стороны, общий объем затрат на инновационную деятель-

ность в РФ составил в 2021 г. приблизительно 2,4 трлн руб. [2]. Следующая причина ограниченности в оценке эффективности связана с неадекватным определением рисков и является характерной для инновационных проектов. Существенным при идентификации рисков является то, что критические технологии могут выявляться по мере исполнения проекта, в результате чего цели проектов оказываются недостижимыми в требуемые сроки. Формально в этих случаях уровень риска должен быть оценен в 100 %, что теоретически должно приводить к отказу от реализации проекта. Очевидно, что экономическая оценка таких проектов по критериям сроков окупаемости и экономической эффективности негативная; должны быть приняты решения об отказе от проектов, что противоречит в ряде случаев требованию обязательной реализации.

Показатель приведенного денежного потока NPV , как известно, позволяет учитывать рыночный контекст и по этой причине может использоваться при принятии решения об его исполнении: проект рекомендуется к исполнению, если $NPV \geq 0$, и не рекомендуется к исполнению, если $NPV < 0$ [3, 4]. Классическими считаются методы оценки эффективности, ориентирующиеся на применение показателя NPV [3, 5–9] и других показателей, формируемых в рамках методологии приведенной стоимости (внутренней нормы доходности IRR ; модифицированной внутренней нормы доходности $MIRR$; срока окупаемости с учетом фактора времени DPP ; индекса рентабельности PI). Следует подчеркнуть, что применение этих методов к инновационным проектам в ряде случаев приводит к ошибочной оценке экономической эффективности. Подобное противоречие наблюдается для большого класса проектов, ориентированных на обеспечение обороноспособности, экологической безопасности, социальных и других [10, 11], когда принятый показатель эффективности проекта противоречит показателю его экономической эффективности. Формально исполнение инновационного проекта вопреки принятым экономическим оценкам снижает ценность таких оценок, поскольку оказывается, что экономическая компонента рассматривается как незначимая. Использование других методов оценки эффективности может рассматриваться как вынужденная мера, направленная на преодоление этого противоречия. Для этого в различных случаях используют: оценку рентабельности инвестиций ROI [12], определение точки безубыточности проекта, экономической добавленной стоимости EVA , использование затратных методов (совокупной стоимости владения TCO ; истинной стоимости владения RCO ; совокупной стоимости владения приложениями TCA), других методов (оценка финансовых и нефинансовых показателей эффективности KPI ; использование сбалансированной системы показателей Нортон и Каплана BSC ; метода прикладной информационной экономики AIE ; метода освоенного объема EVT и др.) [13].

Способ преодоления противоречия в оценках эффективности может быть связан с использованием многокритериальных оценок. Известны различные варианты многокритериальной оценки эффективности [14–18]. Применение многокритериальной оценки нацелено на комплексный учет различных факторов и могло бы в принципе ответить на вопрос об эффективности проекта в сложных случаях, например, при проектировании [19]. Однако этот подход имеет ограничения, поскольку может быть подвержен субъективному фактору, связанному с личным опытом экспертов. С другой стороны, многокритериальная оценка, учитывая различные, в том числе неэкономические факторы, может не согласовываться с результатами экономических оценок. Как следствие, результаты оценки не могут считаться достоверными до момента завершения проекта, что в значительной мере снижает их значимость, поскольку оказывается, что выбор метода оценки определяет результат оценки и определяется успешностью деятельности предприятия, реализующего проект. Другими словами, если метод оценки выбран неудачно, или, несмотря на успешность проекта, по мере его исполнения ухудшаются некоторые показатели деятельности предприятия, вывод об эффективности проекта может быть поставлен под сомнение.

Уровень и график затрат проекта должны быть согласованы с уровнем и графиком затрат предприятия, реализующего проект. В условиях отсутствия такой согласованности реализация экономически эффективного проекта может поставить под вопрос устойчивость успешного предприятия: проект может быть эффективным с точки зрения достижения поставленной проектной цели, однако неуспешным, если его реализация будет противоречить целям, которые будут возникать перед предприятием. Релевантность экономических оценок эффективности позволяет повысить адекватность решений, направленных на улучшение показателей компаний, реализующих проекты. Конечная цель состоит в том, чтобы облегчить определение эффективных

стратегий управления компаниями, реализующими инновационные проекты. Сложность определения концепции эффективности проистекает из ее многомерного характера, объединяющего различные аспекты, связанные с менеджментом, финансами, бухгалтерским учетом и др. [13, 20]. Можно предположить, что качество используемых инструментов определения эффективности влияет на эффективность управления, несмотря на то, что исследования не демонстрируют однозначной связи [21].

Итак, можно сделать общий вывод, что задача разработки метода оценки эффективности проекта, согласованного с методом принятия решения о его исполнении, остается нерешенной. Оценка эффективности должна учитывать временной фактор и в экономическом аспекте быть связанной с оценкой проектов, полученной с применением методов, ориентированных на вычисление NPV и других оценок в рамках методологии приведенной стоимости. С другой стороны, искомая оценка должна быть согласованной с оценкой финансовой деятельности предприятия, реализующего проект, и учитывать в полной мере все элементы денежного потока, когда бы они ни возникали в будущем. Необходима модель, которая обеспечивает согласованность показателей эффективности проекта и предприятия.

Описание проблемы

Количественный аспект описанной проблемы оценки эффективности проводится на примере анализа NPV трех проектов, один из которых является модельным. В качестве модельного рассматривается условный проект длительностью $N = 30$ лет, характеризуемый ежегодной величиной денежного потока в 1 условную единицу: $q_i = 1$, $i = 0, 1, 2, \dots$. Величина приведенной стоимости потока описывается формулой [9]

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{(1+\varepsilon)^i} = \sum_{i=1}^{30} \frac{1}{(1+\varepsilon)^i}. \quad (1)$$

Здесь i – это год исполнения проекта; N – длительность модельного проекта, измеренная в годах; ε – оцениваемый уровень доходности проекта; $q_i = 1$ – элемент денежного потока i -го года. Для простоты предполагается, что доходность постоянна во времени: $\varepsilon = \text{const}$. Следует отметить, что величина доходности ε связана с уровнем риска σ , присущим проекту:

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma). \quad (2)$$

Вычисление NPV предполагает прогнозирование денежного потока на всем промежутке времени исполнения проекта, в рассматриваемом случае, на промежутке 30 лет.

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i. \quad (3)$$

Более точно прогнозируются денежный поток Q_1 первых t лет:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^t q_i. \quad (4)$$

Ему соответствует приведенный поток $NPV_1(t)$. Оставшаяся часть денежного потока Q_2 в пределах промежутка $\Delta t_2 = (t, 30)$

$$Q_2 = \sum_{i=t}^{30} q_i \quad (5)$$

формирует приведенную величину $NPV_2(t)$:

$$NPV_2(t) = NPV - NPV_1(t). \quad (6)$$

Игнорирование потока Q_2 сказывается на величине NPV_2 . На рис. 1 для модельного примера представлен график

$$NPV_1(t) = \delta(t) \cdot NPV, \quad (7)$$

где δ обозначает долю приведенной стоимости NPV , формируемую потоком Q_1 . В модельном примере платежи первых 5 лет формируют $\delta = 80\%$ приведенной стоимости NPV , если прибыльность $\varepsilon = 30\%$. Денежный поток Q_1 составляет 20% от общей величины денежного потока Q :

$$Q_1(t) = \alpha(t) \cdot Q, \quad \alpha(5) = 20\%. \quad (8)$$

Графики на рис. 2 дают представление об учитываемых и неучитываемых денежных потоках при различных показателях доходности. Чем больше доходность ε , тем более кривая зависимости

$$NPV_1 = f(Q_1) \quad (9)$$

отклоняется от прямой, обозначенной NPV_1' :

$$NPV_1' = Q_1. \quad (10)$$

Величина отклонения $\Delta = |NPV_1 - NPV'_1|$ коррелируется с денежным потоком, который игнорируется при оценке эффективности проекта, если Q_2 интерпретировать как непрогнозируемый денежный поток.

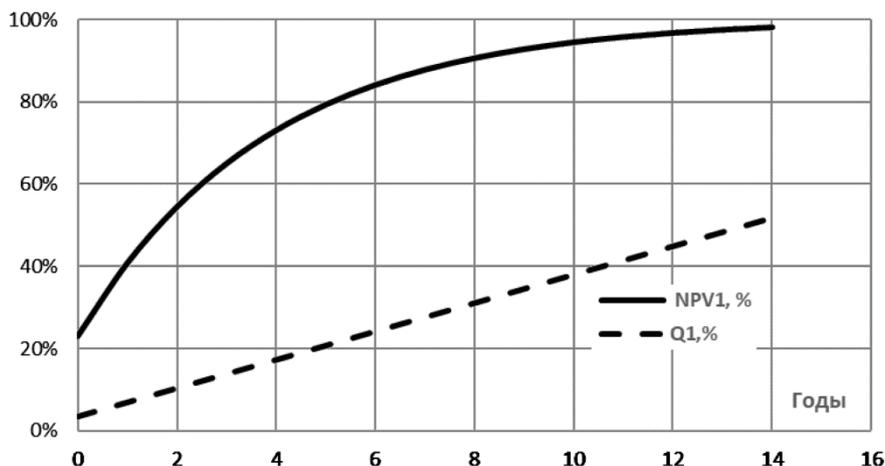


Рис. 1. Зависимость части приведенной стоимости NPV_1 и части денежного потока Q_1 от времени для модельного проекта
Fig. 1. Dependence of a part of the present value of NPV_1 and a part of the cash flow Q_1 on time for a model project

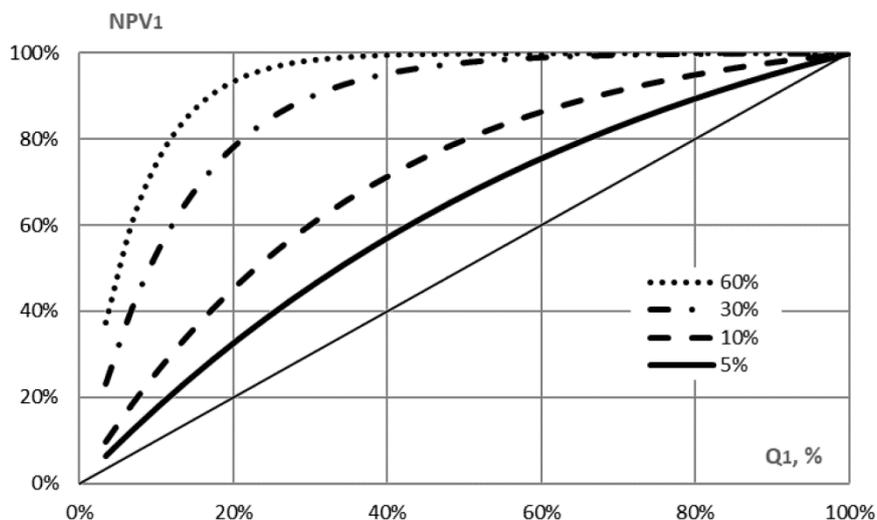


Рис. 2. Сопоставление NPV_1 и денежного потока Q_1 для модельного примера при значениях доходности $\varepsilon = 5 \dots 60 \%$
Fig. 2. Comparison of NPV_1 and cash flow Q_1 for a model example with yield values $\varepsilon = 5 \dots 60 \%$

Методология

Существо предлагаемой модели эффективности базируется на оценке социофизического потенциала проекта и заключается в определении и сопоставлении накопленных потенциалов активов проекта. Сопоставление потенциалов в динамике позволяет сделать необходимые выводы об эффективности оборудования, команды и ресурсов проекта. Обоснование, предпосылки и основы математического аппарата изложены в работах [22, 23] и других. Они составляют теоретическую базу социофизического направления анализа сложных процессов.

Применительно к проекту численной оценкой социофизического потенциала является накопленный экономический потенциал. Накопленный экономический потенциал отражает экономический аспект социофизического потенциала и складывается в результате проектной деятельности предприятия. Проект в рамках социофизического подхода рассматривается как активная,

управляемая система, являющаяся подсистемой предприятия. В общем случае накопленный экономический потенциал проекта определяется следующим соотношением [22]:

$$X(q, t) = \int_{\tau=0}^t q(t - \tau)\psi(\tau)d\tau, \quad (11)$$

где $q(t)$ – это переменная состояния, множество которых характеризует проект как объект управления; t – время; τ – параметр времени; $\psi(\tau)$ – социофизическая функция, обладающая следующими свойствами: $|\psi(t)| \rightarrow 0$, если $t \rightarrow \infty$; $\psi(t) = 0$, если $t < 0$; $\|\psi\| = 1$. Потенциал проекта интерпретируется как потенциал его активов. Эффективность проекта определяется как эффективность использования его активов. Более эффективный проект связан или с большим увеличением потенциала за определенный промежуток времени при одинаковых потенциалах ресурсов, или с меньшим временем достижения целевой величины потенциала проекта. В соответствии с этим в качестве показателей эффективности используются коэффициенты, демонстрирующие прирост потенциала проекта.

Оценка эффективности проекта осуществляется в связи с тем, как проект может повлиять на деятельность предприятия, реализующего его. Рассматриваются два варианта: первый вариант, когда предприятие функционирует без исполнения проекта, и второй вариант, когда предприятие функционирует с исполненным проектом. Пусть в первом случае накопленный экономический потенциал предприятия изменяется на ΔY при изменении потенциалов ресурсов на $\Delta Y_{\text{рес}}$; во втором случае – накопленный экономический потенциал предприятия изменится на $\Delta Y'$ при изменении потенциалов ресурсов на ту же величину $\Delta Y_{\text{рес}}$ (рис. 3). Экономическая оценка эффективности проекта определяется соотношением

$$k_{\text{эфф}} = \frac{\Delta Y' - \Delta Y}{\Delta Y}, \%. \quad (12)$$

Величина изменения потенциала $\Delta Y_{\text{пр}} = \Delta Y' - \Delta Y$ определяется как приращение потенциала предприятия, вызванного исполнением проекта.

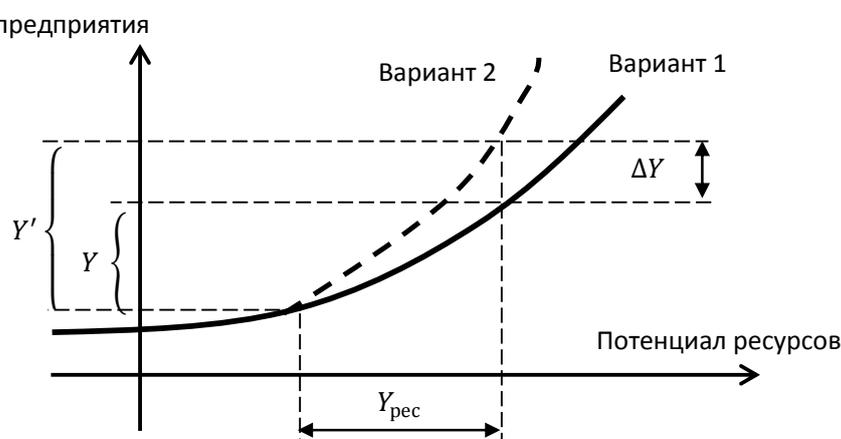


Рис. 3. Графическая интерпретация коэффициентов эффективности
Fig. 3. Graphical interpretation of efficiency coefficients

Формула (12) дает представление о вкладе проекта в изменение эффективности предприятия. С другой стороны, проект может рассматриваться вне конкретного предприятия как самостоятельная организационно-экономическая единица. В этой связи встает ряд задач, например, задача о выборе из двух проектов. Этот случай приведен на рис. 4: показаны графики изменения потенциалов, целевые значения которых равны $Y_{\text{пр},1}$ и $Y_{\text{пр},2}$; прогнозируемые длительности проектов равны T_1 и T_2 соответственно. Выбор из двух проектов осуществляется на основании сопоставления критериев эффективности, определяемых отношением целевых значений накапливаемых потенциалов к их длительностям:

$$k_{\text{эфф},1} = \frac{Y_{\text{пр},1}}{T_1}, \quad k_{\text{эфф},2} = \frac{Y_{\text{пр},2}}{T_2}. \quad (13)$$

Выбирается тот проект, у которого показатель эффективности больше.

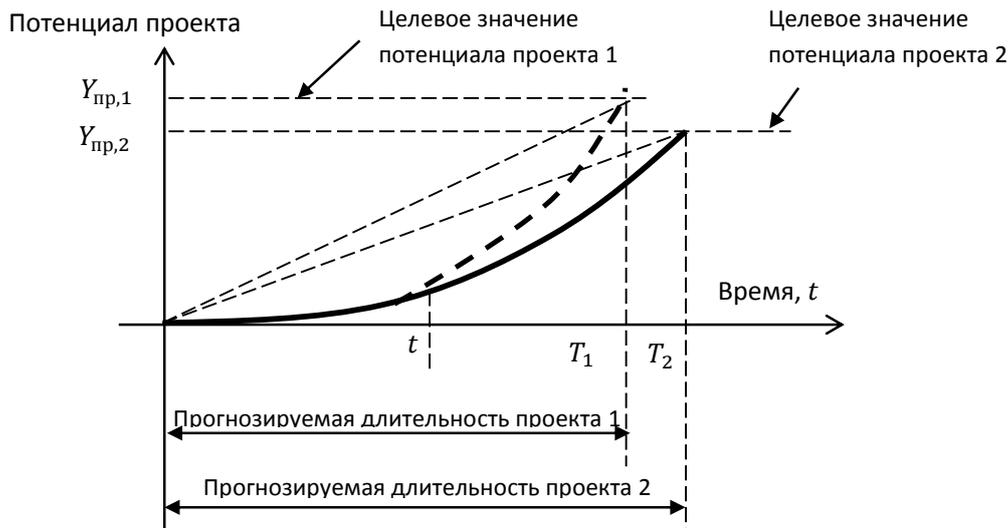


Рис. 4. Сопоставление проектов
Fig. 4. Project comparison

Вычислительные расчёты

На рис. 5 приведены результаты расчета NPV_1 проекта, связанного с созданием высокотехнологического изделия. При доходности $\varepsilon = 30\%$ денежный поток первых 5 лет определяет $\delta \approx 65\%$ величины NPV . Не учитываемый денежный поток $Q_2 \approx 80\%$. Другими словами, как бы ни складывалась финансово-экономическая ситуация на предприятии, реализующем проект, за горизонтом $t > 5$ лет это практически не сказывается на оценке эффективности проекта. Налицо возможное несоответствие эффективности проекта и предприятия, реализующего проект. Подтверждается вывод, что лишь незначительная часть денежного потока определяет величину приведенной стоимости.

Расчеты, проведенные для других проектов, подтверждают приведенные результаты. Оценка эффективности проекта с временем исполнения $T > 5$ лет может противоречить оценке эффективности реализующего предприятия. Объем неучтенных платежей равен $\alpha \approx 60\%$, учитываемая величина чистой приведенной стоимости $NPV_1 \approx 60\%$. Можно сделать вывод, что предприятие, включаясь в длительный проект, может его не исполнить в результате ухудшения финансово-экономических показателей, которые никак не отражаются в показателях эффективности проекта.

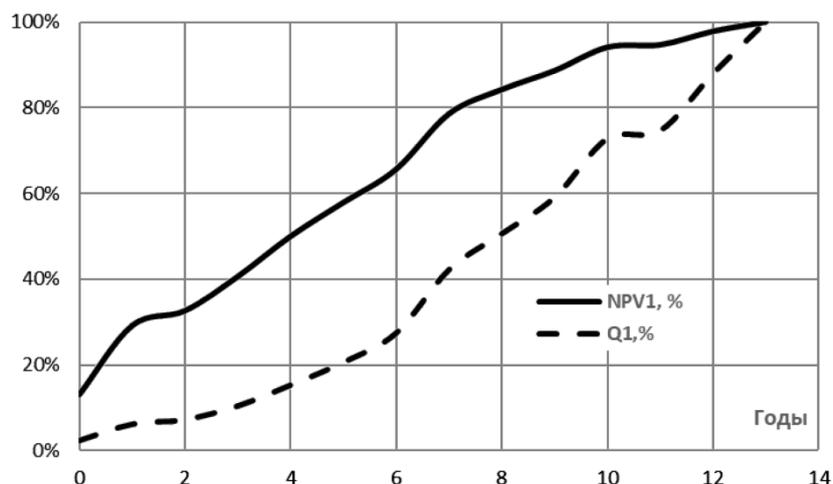


Рис. 5. Зависимость части приведенной стоимости NPV_1 и части денежного потока Q_1 от времени для проекта разработки высокотехнологического изделия, доходность $\varepsilon = 30\%$
Fig. 5. The dependence of a part of the present value of NPV_1 and a part of the cash flow Q_1 on time for a high-tech product development project, profitability $\varepsilon = 30\%$

Сопоставление алгоритмов принятия решения на основании приведенной стоимости и потенциалов производится на примере задачи о выборе станка [8]. Станки имеют разные конструкции, но одинаковые мощности; на них выполняются одни и те же операции. Станок А стоит 15 000 долл. и считается, что он прослужит 3 года; стоимость эксплуатации составляет 4000 долл./год. Станок Б более «экономичен», его цена 10 000 долл., но прослужит он 2 года, стоимость эксплуатации составляет 6000 долл./год. Выбор станка в соответствии с методологией приведенной стоимости связан с оценкой приведенной стоимости потока затрат при прогнозируемой величине коэффициента дисконтирования r . Расчет NPV при $r = 6\%$ приведен в табл. 1. Следующий шаг заключается в определении аннуитетных платежей. Предполагается, что аннуитетный платеж определяет, сколько будет ежегодно стоить станок приобретающей стороне. Для станка А величина аннуитета составляет 9610 долл., для станка Б – 11 450 долл.:

$$9610 + \frac{9610}{1+0,06} + \frac{9610}{(1+0,06)^2} + \frac{9610}{(1+0,06)^3} = 25\,690 \text{ долл.},$$

$$11\,450 + \frac{11\,450}{1+0,06} + \frac{11\,450}{(1+0,06)^2} = 21\,000 \text{ долл.}$$

Станок А каждый год стоит 9610 долл., что меньше ежегодной стоимости станка Б, равной 11 450 долл. Из этого делается вывод, что станок А предпочтительней станка Б.

Таблица 1
Table 1

Затраты на приобретение станков А и Б
The cost of purchasing machines A and B

Станок	Затраты, тыс. долл.				NPV, тыс. долл.
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	
А	+15	+4	+4	+4	25,69
Б	+10	+6	+6		21,00

Результаты расчета потенциалов затрат станков приведены в табл. 2. На рис. 6 приведены графики накапливаемых потенциалов. Из рис. 6 видно, что станок А в течение первых двух периодов из трех обладает большим накапливаемым потенциалом затрат, чем станок Б, и только в третий период потенциал станка А (27,0 тыс. долл.) становится меньше, чем потенциал станка Б (28,8 тыс. долл.). Таким образом, в промежутке времени 2 года предпочтительным является станок Б. Начиная с третьего года, более предпочтительной становится эксплуатация станка А.

Таблица 2
Table 2

Накапливаемые потенциалы затрат
Accumulated cost potentials

Период	Затраты, тыс. долл.			
	0	1	2	3
Станок А	15	19	23	27
Станок Б	10	16	22	28*

* Величина накопленного потенциала станка Б получена из условия, что затраты на эксплуатацию сохраняются на уровне 6000 долл./год.

Можно сделать вывод о том, что расчет потенциалов позволяет естественным образом определить время эффективной эксплуатации оборудования; использование NPV для этих целей затруднительно.

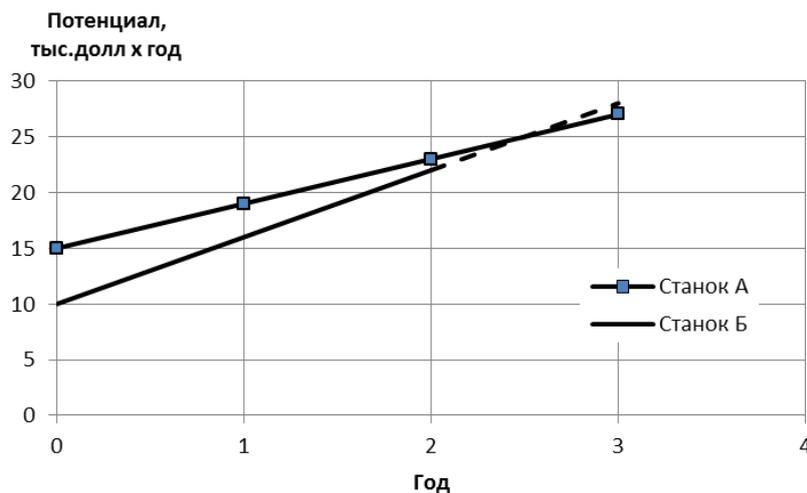


Рис. 6. Графики изменения потенциалов затрат станков А и Б
Fig. 6. Graphs of changes in the cost potentials of machines A and B

Заключение

На основании изложенного можно сделать вывод, что для более точной оценки эффективности проекта необходимо учитывать, что его реализация сказывается на характеристиках предприятия. Можно сделать следующий вывод о возможности повышения эффективности проектов: повышение эффективности проектов и программ проектов возможно через оценку и управление накапливаемыми потенциалами организационных единиц предприятия.

Список литературы

1. ТАСС: сайт. URL: <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1136666> (дата обращения: 24.02.2020).
2. Институт статистических исследований и экономики знаний: сайт. URL: <https://issek.hse.ru/news/760571653.html> (дата обращения: 20.12.2022).
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (2-я редакция). (Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999, № ВК 477).
4. Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). М.: ОАО «НПО «Изд-во «Экономика», 2000. 421 с.
5. Крюков С.В. Новые подходы к оценке инвестиционных проектов // Известия ТРТУ. 2006. № 4. С. 178–184.
6. Липсиц И.В., Коссов В.В. Экономический анализ реальных инвестиций: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Магистр, 2007. 383 с.
7. Ванеева И.В., Сиволап А.В. Методы оценки инвестиционных проектов // Экономика и управление. 2008. № 5. С. 7–13.
8. Бредли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов: пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 1997. 1086 с.
9. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов. М.: Финансы и статистика, 2000. 144 с.
10. Серов В.М. О развитии методологии и методов анализа и оценки экономической эффективности капиталобразующих инвестиционно-строительных проектов // Экономика строительства. 2017. № 5 (47). С. 18–29.
11. Царев В.В., Канторович А.А. Анализ действующих методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия Экономика. 2004. № 2 (3). С. 91–97.
12. Vukovic N., Makogon E. WasteWaste-to-Energy Generation: Complex Efficiency Analysis of Modern Technologies // Sustainability. 2022. Vol. 14 (21). P. 13814. DOI: 10.3390/su142113814
13. Tudose M.B., Rusu V.D., Avasilcai S. Financial performance – determinants and interdependencies between measurement indicators // Business, Management and Economics Engineering. 2022. Vol. 20 (1). P. 119–138. DOI: 10.3846/bmee.2022.16732

14. Бывшев В.А., Михалева М.Ю. Модель многокритериальной приоритизации региональных инвестиционных проектов // Региональная экономика: теория и практика. 2012. № 45. С. 2–10.
15. Калугин В.А. Многокритериальная оценка инвестиционных проектов // Вестник ОГУ. 2004. № 4. С. 61–64.
16. Кириллов Ю.В., Досуужева Е.Е. Методика оценки коммерческой эффективности инвестиционных проектов // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 32. С. 45–52.
17. Рощина Е.В. Методика оценки и отбора инвестиционных проектов в промышленной сфере для включения в федеральную целевую программу // Российский экономический интернет-журнал [Электронный ресурс]: Интернет-журнал АТиСО. 2010. С. 1–12. URL: <https://www.e-rej.ru/Articles/2010/Roschina.pdf>.
18. Сиволап А.В. Многокритериальный подход к выбору оптимального инвестиционного проекта // Экономика и управление. 2010. № 1. С. 83–90.
19. Ikudayisi A.E., Chan A.P.C., Darko A. Integrated design process of green building projects: A review towards assessment metrics and conceptual framework // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 50. P. 104180. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104180
20. Prahalathan B., Ranjany R.P. The impact of capital structure choice on firm performance: Empirical investigation of listed companies in Columbo Stock Exchange, Sri Lanka // International Journal of Research in Commerce and Management. 2011. Vol. 2 (4). P. 12–16.
21. Afonina A. Strategic management tools and techniques and organizational performance: Findings from the Czech Republic // Journal of Competitiveness. 2015. Vol. 7 (3). P. 19–36. DOI: 10.7441/joc.2015.03.02
22. Мустаев И.З. Механика живых и интеллектуальных систем: учеб. пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2020. 160 с.
23. Мустаев И.З. Социофизические модели инноватики: учеб. пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2017. 174 с.

References

1. TASS: website. (In Russ.) Available at: <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1136666> (accessed 24.02.2020).
2. Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge: website. (In Russ.) Available at: <https://issek.hse.ru/news/760571653.html> (accessed 20.12.2022).
3. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov (2-ya redaktsiya). (Utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF, Gosstroem RF 21.06.1999, No. VK 477 [Methodological Recommendations on the assessment of investment projects efficiency (2nd edition). (Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation, Gosstroy of the Russian Federation 21.06.1999, No. VK 477)]. (In Russ.)
4. Kossov V.V., Livshits V.N., Shakhnazarov A.G. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov (vtoraya redaktsiya) [Methodical Recommendations on Investment Projects Efficiency Assessment (Second Edition)]. Moscow: Ekonomika; 2000. 421 p. (In Russ.)
5. Kryukov S.V. [New approaches to the assessment of investment projects]. Izvestiya TRTU. 2006;(4):178–184. (In Russ.)
6. Lipsits I.V., Kossov V.V. Ekonomicheskiy analiz real'nykh investitsiy: uchebnik [Economic analysis of real investments: textbook]. 3rd edition, revision and additions. Moscow: Magistr; 2007. 383 p. (In Russ.)
7. Vaneyeva I.V., Sivolap A.V. [Methods of investment projects evaluation]. Economics and management = Ekonomika i upravlenie. 2008;(5):7–13. (In Russ.)
8. Brealey R., Myers S. Principles of Corporate Finance. Transl. from Engl. Moscow: Olimp-Biznes; 1997. 1086 p. (In Russ.)
9. Kovalev V.V. Metody otsenki investitsionnykh projektov [Methods of investment projects evaluation]. Moscow: Finansy i statistika; 2000. 144 p. (In Russ.)
10. Serov V. M. Serov V.M. On the development of methodology and methods for the analysis and evaluation of the economic efficiency of capitalforming investment-building projects. Economics of construction. 2017;5(47):18–29.(In Russ.)
11. Tsarev V.V., Kantorovich A.A. [Analysis of the current methodological recommendations for assessing the effectiveness of investment projects. Bulletin of INZHECON. Series Economics. 2004;2(3):91–97. (In Russ.)

12. Vukovic N., Makogon E. WasteWaste-to-Energy Generation: Complex Efficiency Analysis of Modern Technologies. *Sustainability*. 2022;14(21):13814. DOI: 10.3390/su142113814
13. Tudose M.B., Rusu V.D., Avasilcai S. Financial performance – determinants and interdependencies between measurement indicators. *Business, Management and Economics Engineering*. 2022;20(1):119–138. DOI: 10.3846/bmee.2022.16732
14. Byvshev V.A., Mikhaleva M.Yu. [Model of multi-criteria prioritisation of regional investment projects]. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2012;45:2–10. (In Russ.)
15. Kalugin V.A. [Multicriteria evaluation of investment projects]. *Vestnik OSU*. 2004;(4):61–64. (In Russ)
16. Kirillov Yu.V., Dosuzheva E.E. [Methodology for assessing the commercial efficiency of investment projects]. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2013;32:45–52. (In Russ.)
17. Roshchina E.V. [Methodology of evaluation and selection of investment projects in the industrial sphere for inclusion in the federal target program]. *Russian Economic Internet Journal [Electronic resource]: Internet journal ATSO*. 2010. P. 1–12. (In Russ.) Available at: <https://www.e-rej.ru/Articles/2010/Roschina.pdf>.
18. Sivolap A.V. [Multicriteria approach to the selection of the optimal investment project]. *Economics and management = Ekonomika i upravlenie*. 2010;(1):83–90. (In Russ.)
19. Ikudayisi A.E., Chan A.P.C., Darko A. Integrated design process of green building projects: A review towards assessment metrics and conceptual framework. *Journal of Building Engineering*. 2022;50:104180. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104180
20. Prahalathan B., Ranjany R.P. The impact of capital structure choice on firm performance: Empirical investigation of listed companies in Columbo Stock Exchange, Sri Lanka. *International Journal of Research in Commerce and Management*. 2011;2(4):12–16.
21. Afonina A. Strategic management tools and techniques and organizational performance: Findings from the Czech Republic. *Journal of Competitiveness*. 2015;7(3):19–36. DOI: 10.7441/joc.2015.03.02
22. Mustaev I.Z. *Mekhanika zhivyykh i intellektual'nykh sistem: ucheb. posobie* [Mechanics of living and intelligent systems. Textbook]. Ufa: EPC USATU; 2020. 160 p. (In Russ.)
23. Mustaev I.Z. *Sotsiofizicheskie modeli innovatiki: ucheb. posobie* [Sociophysical models of theory of innovations. Textbook]. Ufa: EPC USATU; 2017. 174 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Мустаев Ирек Закиевич, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой управления инновациями, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; fermi_moustaev@mail.ru.

Максимова Наталья Константиновна, директор по программно-проектному управлению и организационному развитию, ПАО «ОДК-УМПО», Уфа, Россия; natalia_02.78@mail.ru.

Мустаева Диана Ирековна, аналитик, отдел сопровождения цифровых систем Управления цифровой трансформации, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; musssdiana@mail.ru.

Information about the authors

Irek Z. Mustaev, Dr. Sci. (Econ.), Prof., Head of the Department of Innovation Management, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; fermi_moustaev@mail.ru.

Natalia K. Maksimova, Director for Program and Project Management and Organizational Development, PJSC “UEC-UMPO”, Ufa, Russia; natalia_02.78@mail.ru.

Diana I. Mustaeva, Analyst of the Digital Systems Support Department of the Digital Transformation Directorate, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; musssdiana@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.08.2023

The article was submitted 24.08.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА Z-DEMATEL ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАДРАМИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

О.В. Логиновский¹, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

А.В. Голлай¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

А.А. Максимов², <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

Е.В. Гусев¹, gusevev@susu.ru

М.В. Щемлев³, 33333rudder@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия

³ ООО «РАЗМЕР», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Кадровые проблемы в машиностроении для нашей страны не являются чем-то новым. Так, уже в 1990-х гг. данная отрасль промышленности испытывала острую потребность в квалифицированном персонале, а в 2000 г., вследствие возникновения необходимости увеличения объемов производства, дефицит кадров стал ощущаться еще более остро. В настоящее время из-за резкого увеличения гособоронзаказа и потребности в загрузке примыкающих к нему производств проблема кадрового дефицита имеет максимальные показатели за последние 30 лет. Результаты конъюнктурного опроса руководителей около 1000 промышленных предприятий, проведенного специалистами Института экономической политики им. Егора Гайдара в апреле 2023 г., показали, что около одной трети промышленных предприятий столкнулись с недостаточным количеством персонала как одним из основных препятствий для увеличения количества выпускаемой продукции. **Цель исследования:** выявить основные факторы, влекущие за собой проблемы управления кадровыми ресурсами российских машиностроительных предприятий и трудности при выполнении заказов. Используя гибридный подход, определить важность каждого фактора, их взаимовлияние и провести классификацию по признакам «причина – эффект». **Методы.** Факторы выявлены на основе анализа литературы и исследований научного сообщества, величины взаимовлияний факторов определены с помощью двухэтапного опроса экспертов. Метод DEMATEL использован для получения весовых характеристик каждого фактора, их классификации и определения уровня взаимовлияния. Данный метод позволяет изучать взаимосвязи между рассматриваемыми явлениями через причинно-следственную диаграмму. Для снижения фактора неопределенности субъективных мнений применен метод Z-чисел, которые представлены в виде треугольных. **Результаты.** Выявлены основные факторы, вызывающие сложности с управлением кадровыми ресурсами, собраны экспертные мнения для оценки ситуации их взаимовлияния в настоящее время. Проведена классификация факторов на причины и эффекты. **Заключение.** Результаты исследования могут быть применены на практике кадровыми службами машиностроительных предприятий в условиях необходимости срочного привлечения персонала и повышения его квалификации.

Ключевые слова: кадры, персонал, DEMATEL, дефазсификация, Z-числа, нечеткая логика, машиностроение

Для цитирования: Использование метода Z-DEMATEL для анализа проблем управления кадрами отечественных машиностроительных предприятий / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, А.А. Максимов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 76–86. DOI: 10.14529/ctcr240207

USING THE Z-DEMATEL METHOD TO ANALYZE THE PROBLEMS OF PERSONNEL MANAGEMENT OF DOMESTIC MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

A.V. Hollay¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

A.A. Maksimov², <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

E.V. Gusev¹, gusevev@susu.ru

M.V. Shchemlev³, 33333rudder@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation,
Moscow, Russia

³ LLC "RAZMER", St. Petersburg, Russia

Abstract. Personnel problems in mechanical engineering are not something new for our country. So, already in the 1990s, this industry was in dire need of qualified personnel, and in 2000, due to the need to increase production volumes, the shortage of personnel began to be felt even more acutely. At present, due to a sharp increase in the state defence order and the need to load the industries adjacent to it, the problem of personnel shortage has its highest levels over the past 30 years. The results of a market survey of managers of about 1000 industrial enterprises, conducted by specialists from the Yegor Gaidar Institute of Economic Policy in April 2023, showed that about one-third of industrial enterprises faced an insufficient number of personnel as one of the main obstacles to increasing the number of products. **The purpose of the study** is to identify the main factors that entail the problems of managing human resources of Russian machine-building enterprises and difficulties in fulfilling orders. Using a hybrid approach, determine the importance of each factor, their meanings of mutual influence and classify them according to cause-effect. **Methods.** The factors were identified on the basis of an analysis of the literature and research of the scientific community, the mutual influence of factors was determined using a two-stage survey of experts. The DEMATEL method is used to obtain the weight characteristics of each factor, classify them and determine the mutual influence. This method allows you to study the relationship between the phenomena under consideration through a cause-and-effect diagram. To reduce the uncertainty factor of subjective opinions, the method of Z-numbers, which are presented in the form of triangular numbers, is used. **Results.** The main factors causing difficulties with the management of human resources are identified, expert opinions are collected to assess the situation of their mutual influence at the present time. The classification of factors into causes and effects is carried out. **Conclusion.** The results of the study can be applied in practice by the personnel services of machine-building enterprises in the context of the need for urgent recruitment of personnel and advanced training.

Keywords: HR, personnel, DEMATEL, defuzzification, Z-numbers, fuzzy logic, mechanical engineering

For citation: Loginovskiy O.V., Hollay A.V., Maksimov A.A., Gusev E.V., Shchemlev M.V. Using the Z-DEMATEL method to analyze the problems of personnel management of domestic machine-building enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):76–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240207

Введение

Актуальность проблемы управления кадрами машиностроительных предприятий обусловлена резко возросшей потребностью в увеличении объемов промышленного производства. Параллельно сотрудникам Института экономической политики им. Егора Гайдара на дефицит кадров и их недостаточную квалификацию обратили внимание и в ЦБ РФ. Так, согласно данным мониторинга предприятий за апрель 2023 г., I квартал отметился ухудшением ситуации по сравнению с предыдущим. Наиболее остро проблемы с персоналом испытывают предприятия обрабатывающих производств, добычи полезных ископаемых, водоснабжения, а также транспортировки и хранения [1, 2].

Предпринимаемые меры по индексации зарплат на предприятиях обрабатывающих производств проблемы отсутствия персонала и недостаточность его квалификации не решили. В исследовании было выявлено, что обеспеченность необходимыми для выполнения заказов кадрами оказалась самой низкой с 1998 г. [3].

На необходимость комплексного решения проблем управления кадрами предприятий машиностроения как качественного, так и количественного характера указывает ряд исследований, в которых приводятся различные рекомендации [4–6]. Также проблемы с кадровыми ресурсами отмечены на уровне высшего политического руководства страны, что подтверждает Указ Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации», согласно которому устранению подлежат диспропорции на рынке труда, дефицит рабочих и инженерных кадров. Предполагается также сократить неформальную занятость и повысить уровень профессиональной подготовки специалистов [7].

1. Анализ литературы

Исследованию проблем кадрового обеспечения машиностроительных предприятий посвящено немало исследовательских работ. По результатам изучения литературы по теме выявлены факторы, влияющие на проблемы с персоналом и, как следствие, возможности выпуска продукции (табл. 1). В данном исследовании мы не будем классифицировать факторы как влияющие на проблемы по привлечению персонала и на проблемы по управлению персоналом, а будем рассматривать их в целостной системе для определения их взаимовлияний. Всего было исследовано $f = 9$ факторов.

Факторы, влияющие на проблемы с персоналом

Таблица 1

Table 1

Factors affecting personnel problems

№ п/п	Обозначение	Описание
1	F_1	Разрушение института наставничества на предприятии [8]
2	F_2	Проблема привлечения молодых специалистов [9]
3	F_3	Уход ученых из научно-исследовательских институтов в коммерческие организации [10]
4	F_4	Недостаточная престижность профессии [11]
5	F_5	Отсутствие устойчивых связей между учебными заведениями и промышленными предприятиями [11]
6	F_6	Неравномерная трудовая миграция высококвалифицированных кадров [12]
7	F_7	Недостаточная квалификация выпускников учебных заведений [13]
8	F_8	Дефицит кадров [13]
9	F_9	Сокращение количества выпускников со средним специальным (техническим) образованием [14]

2. Методы

Методология данного исследования состоит из 4 частей. Шаг 1 показывает, как определить и как отфильтровать факторы, влияющие на проблемы управления персоналом; на шаге 2 для снижения влияния неопределенности экспертных мнений применены Z-числа; шаг 3 описывает этапы анализа DEMATEL и дает представление о взаимовлияниях факторов.

Метод DEMATEL был использован в данной работе по причине его возможностей в вычислении весовых характеристик и определения на основе их взаимовлияний рассматриваемых явлений, а рассматриваемые нами факторы не могут считаться независимыми. По результатам метода мы получили матрицу взаимовлияний и определили, какие направления влияния имеются в системе рассматриваемых факторов [15, 16].

Шаг 1. Анализируемые данные были собраны с помощью двухэтапного опроса, в котором участвовали $N = 5$ специалистов в сфере отечественного машиностроения. Участники исследо-

вания были отобраны по обладанию тремя характеристиками одновременно: работа в сфере машиностроения не менее 10 лет на инженерных либо управленческих должностях, опыт в подборе и поиске персонала для производственных задач, выполнение трудовой функции в сфере машиностроения в настоящее время. На первом этапе опроса при попарном сравнении уровней взаимовлияния факторов экспертам предлагалось оценить уровень влияния фактора F_l на фактор F_m . Эксперты составили матрицы отношений X_i , где $i = [1 \dots N]$ – условные номера экспертов. Ответы были даны в виде лингвистических интерпретаций соответствующих нечетких треугольных чисел (далее – ТНЧ), данная форма которых была выбрана для упрощения расчетов (табл. 2). Второй этап опроса в стандартном методе DEMATEL представлял собой необходимость выражения каждым из экспертов своего мнения по поводу достоверности своего ответа [17], но нам представляется, что в таком виде метод не в полной мере учитывает необходимость объективной оценки. В нашем методе экспертам было предложено оценить достоверность ответов других четырех экспертов на первый вопрос. Ответы давались в виде лингвистических интерпретаций по аналогии с оценкой уровней влияния (табл. 3). Каждым экспертом были составлены еще четыре матрицы R_{ij} , где $i = [1 \dots N]$ – условный номер эксперта, а $j = [1 \dots N], j \neq i$.

Шкалы для ответов на вопрос № 1

Таблица 2

Table 2

Response scales for question № 1

Возможные варианты ответа на вопрос № 1	Треугольное нечеткое число
Не влияет	[0; 0; 0,25]
Влияет очень слабо	[0; 0,25; 0,5]
Влияет слабо	[0,25; 0,5; 0,75]
Влияет существенно	[0,5; 0,75; 1]
Влияет очень существенно	[0,75; 1; 1]

Шкалы для ответов на вопрос № 2

Таблица 3

Table 3

Response scales for question № 2

Уровень уверенности	Треугольное число	k	\sqrt{k}
Невозможно	[0,1; 0,2; 0,3]	0,2	0,45
Скорее невозможно	[0,3; 0,4; 0,5]	0,4	0,63
Возможно	[0,5; 0,6; 0,7]	0,6	0,77
Скорее точно	[0,7; 0,8; 0,9]	0,8	0,89
Абсолютно точно	[1; 1; 1]	1	1

Шаг 2. Поскольку мнения экспертов связаны с неопределенностью, использовались Z-числа для снижения её влияния. В классическом варианте Z-число используется в неопределенных вычислениях, т. е. в системе вычислений, в которой объектами вычислений являются не значения переменных, а ограничения на значения переменных. Таким образом, в числе $Z(A, B)$, A – ограничение на значение, которое может принимать Z , а B – вероятность того, что Z находится под влиянием ограничения A [18]. В данном исследовании Z-числа используются в виде совокупности двух ТНЧ. Таким образом, $\tilde{Z}(\tilde{X}, \tilde{R})$ – окончательная оценка каждого ответа каждого эксперта, где $\tilde{X} = (x, y, z)$ – ТНЧ в соответствии с его лингвистической интерпретацией, выданной экспертом (см. табл. 2); $\tilde{R} = (a, b, c)$ – ТНЧ, характеризующее степень достоверности ответа эксперта на вопрос № 1 (см. табл. 3) [19].

В соответствии с предлагаемым методом для вычисления исходной матрицы прямых отношений требуется выполнить ряд дополнительных действий, определяемых следующим алгоритмом.

Шаг 2.1. Из матриц \tilde{R}_{ij} получить матрицы K_{ij} по формуле

$$K_{lm,ij} = \sqrt{(a+b+c)/3}, \quad (1)$$

где $l, m = [1 \dots f]$; a, b, c – составляющие элементы $\tilde{R}_{lm,ij}$.

Шаг 2.2. Из матриц K_{ij} получить матрицы K'_i по формуле

$$K'_{lm,i} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N K_{lm,ij}, j \neq i, \quad (2)$$

где $l, m = [1 \dots f]$.

Тогда, в соответствии с методом, по формуле

$$\tilde{Z}'_{lm,i} = K'_{lm,i} \cdot \tilde{X}_{lm,i}. \quad (3)$$

Шаг 3. Далее нам необходимо построить матрицу прямых влияний, определяемую по формуле

$$\tilde{D}_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{Z}'_{lm,i}. \quad (4)$$

Следующий этап – построение усредненной матрицы \tilde{A} в соответствии с формулой

$$\tilde{A} = \tilde{D} \cdot \tilde{Q}, \quad (5)$$

где $\tilde{Q} = \min \left[\frac{1}{\max \left(\sum_{l=1}^N |\tilde{D}_{lm}| \right)}, \frac{1}{\max \left(\sum_{m=1}^N |\tilde{D}_{lm}| \right)} \right].$

Дальнейшее действие – получение матрицы окончательных отношений \tilde{T} по формуле

$$\tilde{T} = \tilde{A} \cdot (I - \tilde{A})^{-1}, \quad (6)$$

где I – единичная матрица.

Таким образом, матрица \tilde{T} выглядит так, как представлено в выражении

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_{11} & \tilde{t}_{11} & & \tilde{t}_{11} \\ \tilde{t}_{21} & \tilde{t}_{22} & \dots & \tilde{t}_{2m} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \tilde{t}_{l1} & \tilde{t}_{l2} & \dots & \tilde{t}_{lm} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\tilde{t}_{lm} = (t_{lm,u}, t_{lm,v}, t_{lm,w})$ – итоговая оценка уровня влияния фактора F_l по сравнению с фактором F_j . Наиболее важные факторы могут быть определены на основании данных матрицы \tilde{T} .

Суммы строк и суммы столбцов подматриц T_u , T_v и T_w обозначаются ТНЧ \tilde{S}_l и \tilde{C}_m соответственно. Их можно получить с помощью выражений [20]:

$$\tilde{S}_l = \sum_{m=1}^f t_{lm}, l = 1, 2, \dots, f, \quad (8)$$

$$\tilde{C}_m = \sum_{l=1}^f t_{lm}, m = 1, 2, \dots, f, \quad (9)$$

$$\tilde{S}_l + \tilde{C}_m, l = m = 1, 2, \dots, f, \quad (10)$$

$$\tilde{S}_l - \tilde{C}_m, l = m = 1, 2, \dots, f. \quad (11)$$

Для любого фактора F_l значение \tilde{S} представляет собой уровень влияния данного фактора на остальные, а значение \tilde{C} является уровнем влияния которое оказывают остальные факторы на фактор F_l . Величины $\tilde{S} + \tilde{C}$ выявляют важность фактора F_l во всей системе факторов, т. е. чем больше данная сумма, тем F_l важнее. Величины $\tilde{S} - \tilde{C}$ показывают силу чистого влияния фактора F_l на систему. На основании этой разности факторы классифицируются на причины и эффекты. В случае если $\tilde{S}_i - \tilde{C}_i > 0$, фактор является причиной, в противоположном случае – эффектом. Для избавления от ТНЧ необходимо провести дефаззификацию матрицы \tilde{T} и полученных значений \tilde{S} , \tilde{C} , $\tilde{S} + \tilde{C}$, $\tilde{S} - \tilde{C}$ по формуле [21]:

$$S(\tilde{t}_{lm}, 0) = \frac{1}{4}(\tilde{t}_{lm,u} + 2 \times \tilde{t}_{lm,v} + \tilde{t}_{lm,w}). \quad (12)$$

Окончательно получаем итоговую матрицу H и значения S , C , $S + C$, $S - C$ [22].

3. Результаты

Выполнение алгоритма согласно шагам 1–3 обеспечило получение матрицы окончательных отношений \tilde{T} (табл. 4), значений \tilde{S}_l , \tilde{C}_m , $\tilde{S}_l + \tilde{C}_m$, $\tilde{S}_l - \tilde{C}_m$ (табл. 5).

Матрица окончательных отношений

Таблица 4

Table 4

Final relationship matrix

F_i	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
F_1	[0,064; 0,090; 0,192]	[0,146; 0,198; 0,319]	[0,025; 0,038; 0,161]	[0,093; 0,120; 0,230]	[0,085; 0,125; 0,221]	[0,063; 0,091; 0,190]	[0,105; 0,132; 0,240]	[0,127; 0,169; 0,283]	[0,064; 0,097; 0,198]
F_2	[0,161; 0,167; 0,284]	[0,113; 0,122; 0,224]	[0,042; 0,056; 0,179]	[0,145; 0,146; 0,249]	[0,133; 0,143; 0,240]	[0,107; 0,124; 0,223]	[0,062; 0,075; 0,207]	[0,274; 0,270; 0,363]	[0,109; 0,103; 0,198]
F_3	[0,186; 0,194; 0,314]	[0,156; 0,190; 0,314]	[0,042; 0,050; 0,146]	[0,178; 0,184; 0,283]	[0,114; 0,150; 0,265]	[0,098; 0,113; 0,221]	[0,173; 0,199; 0,315]	[0,202; 0,232; 0,364]	[0,054; 0,063; 0,196]
F_4	[0,258; 0,264; 0,369]	[0,350; 0,347; 0,436]	[0,192; 0,181; 0,276]	[0,100; 0,107; 0,208]	[0,144; 0,166; 0,279]	[0,122; 0,132; 0,241]	[0,095; 0,119; 0,263]	[0,371; 0,367; 0,450]	[0,191; 0,187; 0,287]
F_5	[0,254; 0,272; 0,379]	[0,351; 0,364; 0,447]	[0,081; 0,105; 0,246]	[0,115; 0,150; 0,278]	[0,086; 0,107; 0,211]	[0,108; 0,134; 0,257]	[0,192; 0,213; 0,347]	[0,358; 0,369; 0,462]	[0,176; 0,187; 0,302]
F_6	[0,100; 0,135; 0,266]	[0,112; 0,169; 0,304]	[0,035; 0,056; 0,175]	[0,031; 0,060; 0,194]	[0,088; 0,118; 0,229]	[0,026; 0,044; 0,131]	[0,028; 0,055; 0,196]	[0,130; 0,180; 0,319]	[0,045; 0,068; 0,185]
F_7	[0,084; 0,116; 0,245]	[0,043; 0,109; 0,246]	[0,013; 0,032; 0,148]	[0,037; 0,065; 0,172]	[0,030; 0,058; 0,171]	[0,055; 0,080; 0,167]	[0,014; 0,030; 0,124]	[0,112; 0,152; 0,274]	[0,015; 0,028; 0,147]
F_8	[0,214; 0,225; 0,338]	[0,122; 0,140; 0,270; 0,270]	[0,061; 0,068; 0,174]	[0,081; 0,100; 0,219]	[0,089; 0,103; 0,209]	[0,081; 0,092; 0,184]	[0,042; 0,062; 0,196]	[0,081; 0,097; 0,212]	[0,037; 0,045; 0,168]
F_9	[0,157; 0,177; 0,305]	[0,235; 0,251; 0,359]	[0,051; 0,068; 0,193]	[0,076; 0,088; 0,226]	[0,108; 0,121; 0,234]	[0,117; 0,128; 0,234]	[0,040; 0,065; 0,215]	[0,293; 0,297; 0,394]	[0,044; 0,050; 0,146]

Таблица 5

Значения $\tilde{S}_l, \tilde{C}_m, \tilde{S}_l + \tilde{C}_m, \tilde{S}_l - \tilde{C}_m$

Table 5

Meanings of $\tilde{S}_l, \tilde{C}_m, \tilde{S}_l + \tilde{C}_m, \tilde{S}_l - \tilde{C}_m$

F_i	\tilde{S}_l	\tilde{C}_m	$\tilde{S}_l + \tilde{C}_m$	$\tilde{S}_l - \tilde{C}_m$
F_1	[0,77; 1,06; 2,03]	[1,48; 1,64; 2,69]	[2,25; 2,70; 4,73]	[-0,71; -0,58; -0,66]
F_2	[1,15; 1,21; 2,17]	[1,63; 1,89; 2,92]	[2,77; 3,10; 5,09]	[-0,48; -0,68; -0,75]
F_3	[1,20; 1,38; 2,42]	[0,54; 0,65; 1,70]	[1,75; 2,03; 4,12]	[0,66; 0,72; 0,72]
F_4	[1,82; 1,87; 2,81]	[0,86; 1,02; 2,06]	[2,68; 2,89; 4,87]	[0,97; 0,85; 0,75]
F_5	[1,72; 1,90; 2,93]	[0,88; 1,09; 2,06]	[2,60; 2,99; 4,99]	[0,84; 0,81; 0,87]
F_6	[0,60; 0,89; 2,00]	[0,78; 0,94; 1,85]	[1,37; 1,82; 3,85]	[-0,18; -0,05; 0,15]
F_7	[0,40; 0,67; 1,69]	[0,75; 0,95; 2,10]	[1,15; 1,62; 3,80]	[-0,35; -0,28; -0,41]
F_8	[0,81; 0,93; 1,97]	[1,95; 2,13; 3,12]	[2,76; 3,07; 5,09]	[-1,14; -1,20; -1,15]
F_9	[1,12; 1,25; 2,31]	[0,74; 0,83; 1,83]	[1,86; 2,07; 4,13]	[0,39; 0,42; 0,48]

После процедуры дефаззификации матрицы \tilde{T} получена итоговая матрица H (табл. 6), а выявленные с помощью анализа литературы факторы классифицированы на причины и эффекты (табл. 7).

Таблица 6

Итоговая матрица H

Table 6

Final matrix H

F_i	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
F_1	0,109	0,215	0,066	0,141	0,139	0,109	0,152	0,187	0,114
F_2	0,195	0,145	0,083	0,172	0,165	0,145	0,105	0,294	0,128
F_3	0,222	0,213	0,072	0,207	0,170	0,136	0,222	0,258	0,094
F_4	0,289	0,370	0,208	0,131	0,189	0,157	0,149	0,389	0,213
F_5	0,294	0,382	0,134	0,173	0,128	0,158	0,241	0,390	0,213
F_6	0,159	0,189	0,081	0,086	0,138	0,061	0,084	0,202	0,092
F_7	0,140	0,127	0,056	0,085	0,079	0,096	0,050	0,173	0,055
F_8	0,251	0,168	0,093	0,125	0,126	0,112	0,091	0,122	0,074
F_9	0,204	0,274	0,095	0,120	0,146	0,152	0,096	0,320	0,073

Таблица 7

Значения $S, C, S+C, S-C$

Table 7

Meanings of $S, C, S+C, S-C$

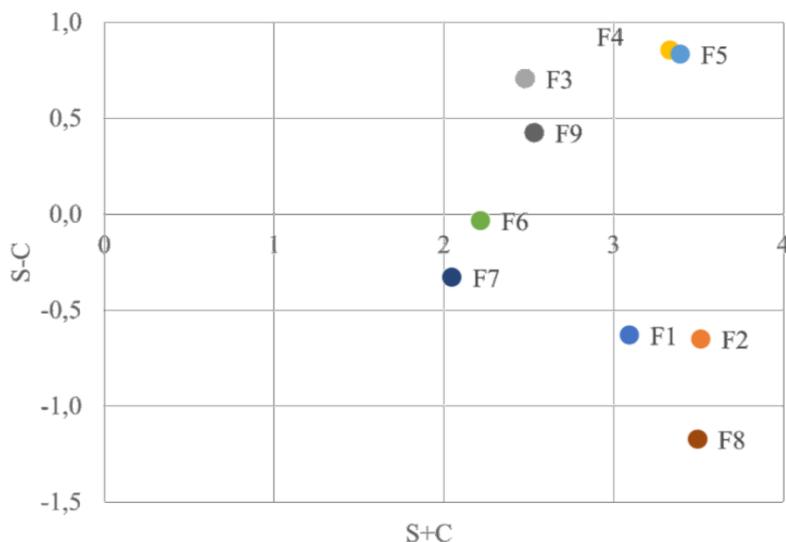
F_i	S	C	$S+C$	$S-C$	Влияние на систему
F_1	1,23	1,86	3,09	-0,63	Эффект
F_2	1,43	2,08	3,51	-0,65	Эффект
F_3	1,59	0,89	2,48	0,71	Причина
F_4	2,09	1,24	3,33	0,85	Причина
F_5	2,11	1,28	3,39	0,83	Причина
F_6	1,09	1,13	2,22	-0,03	Эффект

Окончание табл. 7
Table 7 (end)

F_7	0,86	1,19	2,05	-0,33	Эффект
F_8	1,16	2,33	3,49	-1,17	Эффект
F_9	1,48	1,05	2,53	0,42	Причина

Заключение

В данном исследовании проведен анализ литературы и выявлены факторы, влияющие на проблемы управления персоналом и, как следствие, невозможность выпуска продукции в требуемом количестве и качестве. На основе двухэтапного опроса экспертов были выявлены уровни взаимовлияний вышеуказанных факторов. Научную новизну представляет метод снижения неопределенности при ответах экспертов, а именно – второй этап опроса, на котором эксперты оценивали достоверность ответов других четырех экспертов. В результате применения гибридного подхода, включающего в себя метод DEMATEL в совокупности с Z-числами, были оценены уровни влияний факторов на систему и друг на друга, выявленные факторы классифицированы на причины и эффекты. Как видно из рисунка, факторы F_4 , F_5 и F_3 наиболее влиятельны соответственно, а факторы F_8 , F_2 и F_1 наиболее подвержены влиянию. Чем правее на графике расположен фактор, тем он более важен для контроля над системой.



Уровни влияний факторов на систему и друг на друга
Levels of influence of factors on the system and on each other

Список литературы

1. Краснопевцева И.В. Кадровые проблемы российских промышленных предприятий // Вестник ИрГТУ. 2012. № 9 (68). С. 274–280.
2. Цухло С.В. 35 % промышленных предприятий в России испытывают дефицит кадров [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iep.ru/ru/kommentarii/sergey-tsukhlo-35-promyshlennykh-predpriyatiy-v-rossii-ispytyvayut-defitsit-kadrov.html> (дата обращения: 02.02.2024).
3. Банк России. Мониторинг предприятий № 4. Апрель 2023 г. Информационно-аналитический комментарий [Электронный ресурс]. URL: https://www.cbr.ru/Collection/Collection/File/43904/monitoring_0423.pdf (дата обращения: 02.02.2024).
4. Волков В.И., Кабанов Д.В. Кадровый потенциал как ключевая составляющая устойчивого развития машиностроительных предприятий // Экономика труда. 2018. Т. 5, № 4. С. 1165–1178. DOI: 10.18334/et.5.4.39579
5. Цифровая трансформация экономики и промышленности: проблемы и перспективы: моногр. / А.А. Алетдинова, И.А. Аренков, Р.Р. Афанасьева и др.; под ред. А.В. Бабкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 807 с.
6. Тронина И.А., Татенко Г.И., Злобина И.В. Технологические компетенции для инновационного развития регионов // Вестник академии знаний. 2020. № 40 (5). С. 408–414. DOI: 10.24412/2304-6139-2020-10654
7. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации: утверждена Указом Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389271/ (дата обращения: 02.02.2024).

8. Каштанова Е.В., Захаров Д.К. Цифровая трансформация корпоративной системы обучения // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. 2021. Т. 10, № 1. С. 37–43. DOI: 10.12737/2305-7807-2021-10-1-37-43
9. Надточий Ю.Б., Горелова Л.И. Проблемы ресурсного обеспечения предприятий ракетно-космической отрасли // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9, № 2. С. 541–588.
10. Suvalova T.V., Troitskiy A.V, Zhaxybayeva G.S. Evolution of the Labor Market: Challenges of the Millennial Generation // Digital Economy and the New Labor Market: Jobs, Competences and Innovative HR Technologies. IPM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 161. P. 77–84.
11. Бугаенко М.В. Проблема дефицита квалифицированных кадров на российских машиностроительных предприятиях и пути ее решения // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2013. № 1. С. 107–111.
12. Бараненкова Т.А. Миграция высококвалифицированных кадров: современные тенденции и механизмы регулирования // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2020. № 5. С. 79–93. DOI: 10.24411/2073-6487-2020-10058
13. Тинькова Е.В., Гулуа С. Дефицит квалифицированных кадров и производственный потенциал // Дельта науки. 2018. № 1. С. 12–14.
14. Варшавский А.Е., Кочеткова Е.В. Проблемы дефицита инженерно-технических кадров // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 32. С. 2–16.
15. Singh C., Singh D., Khamba J.S. Analyzing barriers of Green Lean practices in manufacturing industries by DEMATEL approach // Journal of Manufacturing Technology Management. 2020. Vol. 32 (1). P. 176–198. DOI: 10.1108/JMTM-02-2020-0053
16. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study / S. Gandhi, S.K. Mangla, P. Kumar, D. Kumar // International Strategic Management Review. 2015. Vol. 3, iss. 1–2. P. 96–109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001
17. Implementation of Building Information Modeling (BIM) Using Hybrid Z-DEMATEL-ISM Approach / A. RezaHoseini, E. Ahmadi, P. Saremi, M. BagherPour // Hindawi Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021 (1). P. 1–35. DOI: 10.1155/2021/6686761
18. Zadeh L.A. A note on Z-numbers // Information Sciences. 2011. Vol. 181 (14). P. 2923–2932. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022
19. A method of converting Z-number to classical fuzzy number / B. Kang, D. Wei, Y. Li, Y. Deng // Journal of Information & Computational Science. 2012. Vol. 9 (3). P. 703–709.
20. Dalalah D., Hayajneh M., Batiha F. A fuzzy multicriteria decision making model for supplier selection // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38 (7). P. 8384–8391. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.031
21. Baykasoglu A., Kaplanoglu V. A multi-agent approach to load consolidation in transportation // Advances in Engineering Software. 2011. Vol. 42 (7). P. 477–490. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.03.017
22. Kumar S.A., Pal A. Triangular fuzzy matrices // Iranian Journal of Fuzzy Systems. 2007. Vol. 4 (1). P. 75–87.

References

1. Krasnopevtseva I.V. Personnel problems of Russian industrial enterprises. *Proceedings of Irkutsk state technical university = Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2012;9(68):274–278. (In Russ.)
2. Tsukhlo S.V. 35 % *promyshlennykh predpriyatii v Rossii ispytyvayut defitsit kadrov* [35 % of industrial enterprises in Russia experience a shortage of personnel]. (In Russ.) Available at: <https://www.iep.ru/ru/kommentarii/sergey-tsukhlo-35-promyshlennykh-predpriyatii-v-rossii-ispytyvayut-defitsit-kadrov.html> (accessed 02.02.2024).
3. *Bank Rossii. Monitoring predpriyatii No. 4. April' 2023 g. Informatsionno-analiticheskiy kommentariy* [Bank of Russia. Monitoring of enterprises No. 4. April 2023. Information and analytical commentary]. (In Russ.) Available at: https://www.cbr.ru/Collection/Collection/File/43904/monitoring_0423.pdf (accessed 02.02.2024).
4. Volkov V.I., Kabanov D.V. Personnel potential as a key component of machinery enterprises sustainable development. *Russian journal of labor economics*. 2018;5(4):1165–1178. (In Russ.) DOI: 10.18334/et.5.4.39579

5. Aletdinova A.A., Arenkov I.A., Afanas'eva R.R. et al. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti: problemy i perspektivy: monogr.* [Digital transformation of the economy and industry: problems and prospects: monograph]. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnical university; 2017. 807 p. (In Russ.)
6. Tronina I.A., Tatenko G.I., Zlobina I.V. Technological competencies for innovative development of regions. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020;40(5):408–414. (In Russ.) DOI: 10.24412/2304-6139-2020-10654
7. *Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 02.07.2021 No. 400* [National Security Strategy of the Russian Federation: approved by Decree of the President of the Russian Federation dated July 2, 2021 No. 400]. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389271/ (accessed 02.02. 2024).
8. Kashtanova E.V., Zakharov D.K. Digital transformation of the corporate training system. *Human resources and intellectual resources management in Russia*. 2021;10(1):37–43. (In Russ.) DOI: 10.12737/2305-7807-2021-10-1-37-43
9. Nadtochiy Yu.B., Gorelova L.I. Problems of resource provision of rocket and space industry. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2019;9(2):541–588. (In Russ.)
10. Suvalova T.V., Troitskiy A.V., Zhaxybayeva G.S. Evolution of the Labor Market: Challenges of the Millennial Generation. In: *Digital Economy and the New Labor Market: Jobs, Competences and Innovative HR Technologies. IPM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 161. P. 77–84.
11. Bugaenko M.V. The problem of the qualified personnel deficiency at Russian machine-building enterprises and ways of its decision. *Herald of Omsk University. Series "Economics"*. 2013;(1):107–111. (In Russ.)
12. Baranenkova T.A. Migration of highly qualified personnel: modern trends and mechanisms of regulation. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk = The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(5):79–93. (In Russ.) DOI: 10.24411/2073-6487-2020-10058
13. Tinkova E.V., Gulua S. [Shortage of qualified personnel and production potential]. *Del'ta nauki*. 2018;(1):12–14. (In Russ.)
14. Varshavskiy A.E., Kochetkova E.V. [Problems of shortage of engineering and technical personnel]. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2015;(32):2–16. (In Russ.)
15. Singh C., Singh D., Khamba J.S. Analyzing barriers of Green Lean practices in manufacturing industries by DEMATEL approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2020;32(1):176–198. DOI: 10.1108/JMTM-02-2020-0053
16. Gandhi S., Mangla S.K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study. *International Strategic Management Review*. 2015;3(1–2):96–109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001
17. RezaHoseini A., Ahmadi E., Saremi P., BagherPour M. Implementation of Building Information Modeling (BIM) Using Hybrid Z-DEMATEL-ISM Approach. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. 2021;2021(1):1–35. DOI: 10.1155/2021/6686761
18. Zadeh L.A. A note on Z-numbers. *Information Sciences*. 2011;14(181):2923–2932. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022
19. Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y. A method of converting Z-number to classical fuzzy number. *Journal of Information & Computational Science*. 2012;3(9):703–709.
20. Dalalah D., Hayajneh M., Batieha F. A fuzzy multicriteria decision making model for supplier selection. *Expert Systems with Applications*. 2011; 38(7):8384–8391. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.031
21. Baykasoglu A., Kaplanoglu V. A multi-agent approach to load consolidation in transportation. *Advances in Engineering Software*. 2011;42(7):477–490. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.03.017
22. Kumar S.A., Pal A. Triangular fuzzy matrices. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2007;4(1):75–87.

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskii@susu.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusev@susu.ru.

Щемлев Михаил Валерьевич, руководитель отдела реализации комплексных технологических проектов, ООО «РАЗМЕР», Санкт-Петербург, Россия; 33333rudder@mail.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskii@susu.ru.

Alexander V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alexander@hollay.ru.

Alexander A. Maksimov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy, State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia.

Evgeny V. Gusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusev@susu.ru.

Michail V. Shchemlev, Head of the Department for Implementation of Complex Technological Projects, LLC “RAZMER”, St. Petersburg, Russia; 33333rudder@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.08.2023

The article was submitted 29.08.2023

НОВЫЕ РОЛИ РАБОТНИКОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.А. Баркалов, sbarkalov@vgasu.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

Е.А. Авдеева, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

Т.А. Аверина, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

Н.Ю. Калинина, ka_nat@bk.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Глобальные изменения, происходящие в экономике под влиянием цифровизации и автоматизации, неизбежны, и обществу необходимо принимать и учитывать их положительные и отрицательные стороны. **Целью исследования** является изучение структуры и специфики взаимодействия людей и технологий и влияния новых технологий на рабочую среду и процесс, выделение положительных и негативных сторон. **Теоретико-методологической основой** исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросам цифровизации и автоматизации промышленности, возможностям и угрозам перехода к Индустрии 5.0. **Результаты.** Основная мысль концепции – это человекоцентричность – люди и искусственный интеллект как команда. Это обеспечит устойчивое и стабильное производство, позволит снизить затраты в будущем. Структура этого взаимодействия между двумя подсистемами влияет на производительность и эффективность всей системы, а также на здоровье, мотивацию и удовлетворенность сотрудников и благоприятно отражается на будущем развитии. Подчеркнуто, что сотрудничество между людьми и машинами направлено на использование уникальных сильных сторон каждого участника. Автоматизация – это не замена человека, а расширение его возможностей. Это особенно актуально для задач, требующих творчества, критического мышления и принятия сложных решений, в областях, где необходимы человеческая интуиция и изобретательность. Предметом исследования концепции «Индустрия 5.0» стала новая роль людей в производственном процессе. Человек-работник больше связан с информацией и менее уязвим для атак благодаря технологии. Объектом исследования явились цифровые технологии, помогающие, в первую очередь, решить главную проблему нехватки рабочей силы, передавая сложные и утомительные задачи роботам. Это позволяет людям сконцентрироваться и заняться разработкой более взвешенных управленческих решений. Благодаря передовой аналитике и искусственному интеллекту производители могут понять индивидуальные потребности и предпочтения клиентов. Эти данные затем используются для настройки продуктов в процессе производства, обеспечивая уровень персонализации, который ранее считался непрактичным в масштабах. Массовая индивидуализация позволяет выпускать более широкий спектр типов продукции без огромных отходов и загрязнения, поскольку такую индивидуализацию можно производить на одних и тех же производственных линиях с использованием повторно используемых материалов и компонентов. **Заключение.** В статье обобщены плюсы Индустрии 5.0: сокращение сроков и повышение эффективности процессов, их видимость и прозрачность в реальном времени, высокая удовлетворенность клиентов, лучшая безопасность труда и большие возможности управления рисками, эргономика и экологическая устойчивость. Также выделены самые большие препятствия для внедрения технологий: высокие инвестиционные затраты, а также интеграция и нехватка квалифицированных сотрудников.

Ключевые слова: цифровая трансформация промышленности, Индустрия 5.0, социотехническая система, человекоцентричность

Для цитирования: Новые роли работников в условиях цифровой трансформации промышленности / С.А. Баркалов, Е.А. Авдеева, Т.А. Аверина, Н.Ю. Калинина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 87–96. DOI: 10.14529/ctcr240208

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240208

NEW ROLES OF EMPLOYEES IN THE CONDITIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN INDUSTRY

S.A. Barkalov, sbarkalov@vgasu.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

E.A. Avdeeva, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

T.A. Averina, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

N.Yu. Kalinina, ka_nat@bk.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Global changes taking place in the economy under the influence of digitalization and automation are inevitable, and society needs to accept and take into account their positive and negative aspects. **The research objective** is to study the structure and specifics of the interaction between people and technology and the impact of new technologies on the work environment and process, highlighting the positive and negative aspects. **The theoretical and methodological basis of the study** is the work of domestic and foreign researchers devoted to issues of digitalization and automation in industry, opportunities and threats of the transition to Industry 5.0. **Results.** The main idea of the concept is human-centricity – people and artificial intelligence as a team. This will ensure sustainable and stable production, reducing costs in the future. The structure of this interaction between the two subsystems affects the productivity and efficiency of the entire system, as well as the health, motivation and satisfaction of employees and has a positive impact on future development. It is emphasized that collaboration between humans and machines is aimed at leveraging the unique strengths of each participant. Automation is not about replacing humans, but about expanding their capabilities. This is especially true for tasks that require creativity, critical thinking, and complex decision making – areas that require human intuition and ingenuity. The subject of the study of the Industry 5.0 concept was the new role of people in the production process. The human worker is more connected to information and less vulnerable to attack thanks to technology. The object of the study was digital technologies that help, first of all, to solve the main problem of labor shortages by transferring complex and tedious tasks to robots. This allows people to concentrate and develop more informed management decisions. Thanks to advanced analytics and artificial intelligence, manufacturers can understand the individual needs and preferences of customers. This data is then used to customize products during production, providing a level of personalization that was previously considered impractical at scale. Mass customization allows for a wider range of product types to be produced without huge amounts of waste and pollution because such customization can be done on the same production lines using reused materials and components. **Conclusion.** The article summarizes the advantages of Industry 5.0: reduced time and increased efficiency of processes, their visibility and transparency in real time, high customer satisfaction, better occupational safety and greater risk management capabilities, ergonomics and environmental sustainability. The biggest barriers to technology adoption are also highlighted: high investment costs, as well as integration and lack of qualified employees.

Keywords: digital transformation in industry, Industry 5.0, socio-technical system, human-centricity

For citation: Barkalov S.A., Avdeeva E.A., Averina T.A., Kalinina N.Yu. New roles of employees in the conditions of digital transformation in industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2):87–96. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240208

Введение

Целью трансформации промышленности является повышение качества и эффективности труда при радикальном изменении его условий: рабочей среды и рабочего процесса. Прежде всего в цифровом производственном секторе будут развиваться следующие сферы деятельности: передовая промышленная робототехника, промышленный интернет вещей, электрические транспортные средства и промышленная биотехнология. Внедрение новых технологических возможностей будет иметь последствия не только для производственного процесса, но и для условий труда тех, кто занят в этом процессе, а также изменятся требования работодателей к сотрудникам [1, 2]. Новая парадигма «Индустрия 5.0» открывает возможности создания устойчивой, ориенти-

рованной на человека и жизнестойкой промышленности [3]. Люди являются важной частью каждой технической системы, например, проектировщик, менеджер, специалист по техническому обслуживанию или оператор. Социотехническая система, состоящая из двух частей – людей и технологий, – может управляться и оптимизироваться только посредством взаимодействия обеих подсистем.

Материалы и методы

Социально-технологические изменения уже вошли в нашу жизнь – это автоматические кассы в супермаркетах, сетевая логистика от производства до покупателя, а в области высококвалифицированных рабочих мест – алгоритмы самообучения (боты) и большие данные. В производстве и снабжении используются самообучающиеся роботы. На очереди беспилотные автомобили.

Возможности организации сложных структур, производства индивидуализированной продукции и более эффективной работы являются многообещающими. Цифровизация и Индустрия 4.0 легко удовлетворяют эти пожелания: сегодня они позволяют нам производить больше индивидуальных продуктов в массовом масштабе. В тройке лидеров в рейтинге мировой цифровой конкурентоспособности IMD 2023 года оказались США, Нидерланды и Сингапур. Ключевым фактором успеха стали инвестиции в образование и предоставление тех навыков, которые необходимы рынку труда [4].

Почему необходима перестройка Индустрии 4.0? В конечном счете за всеми концепциями, характерными для Индустрии 4.0 и развития умных заводов, стоят усилия по созданию более эффективных процессов. Киберфизические системы (CPS), искусственный интеллект, большие данные, сети и промышленный интернет вещей позволяют автоматизировать и оптимизировать все этапы цепочки создания стоимости [5, 6].

Большая эффективность в конечном итоге означает более высокие продажи независимо от размера компании. Тот факт, что инвестиционные затраты и нехватка квалифицированной рабочей силы во многих отраслях и компаниях по-прежнему препятствуют более широкому использованию технологий Индустрии 4.0, не меняет уже достигнутого потенциала и успехов. Индустрия 5.0 объединяет навыки людей и машин и способствует созданию более целостной и взаимосвязанной производственной экосистемы.

Цели Индустрии 5.0 можно резюмировать следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Цели Индустрии 5.0
Fig. 1. Goals of Industry 5.0

Прежде всего достижение этих целей требует целенаправленного использования искусственного интеллекта. Он имитирует когнитивные способности человека, распознавая и сортируя информацию из входных данных. Этот интеллект может быть основан на запрограммированных процессах или создан с помощью машинного обучения [7].

За последние годы достигнут большой прогресс, особенно в области машинного обучения. В первую очередь это связано с растущей доступностью больших объемов данных и высокой вычислительной мощностью, которые являются основным требованием для сложных вычислений машинного обучения.

В процессах машинного обучения алгоритм учится выполнять задачу самостоятельно посредством повторения. Машина основана на заданном критерии качества и информативности данных. В отличие от традиционных алгоритмов, путь решения не моделируется. Компьютер учится самостоятельно распознавать структуру данных. Например, роботы могут научиться захватывать определенные объекты, чтобы транспортировать их из пункта А в пункт Б. Им лишь говорят, откуда и куда следует перевезти предметы. Как именно робот захватывает, можно узнать путем многократных проб и ошибок, а также благодаря отзывам об успешных попытках.

Подобластью машинного обучения являются нейронные сети. Эти алгоритмы обучения основаны на связях нервных клеток человеческого мозга. Мозг обрабатывает информацию через нейроны и синапсы. Аналогично, искусственные нейронные сети состоят из нескольких рядов узлов данных, которые соединены друг с другом взвешенными соединениями.

Нейронная сеть обучается путем многократного предоставления ей данных. Благодаря этому повторению нейронная сеть каждый раз учится более точно классифицировать данные. Это работает путем постоянной корректировки веса отдельных связей между слоями нейронов. Модель, созданная в ходе обучающих прогонов, затем может быть применена к данным, о которых искусственный интеллект (ИИ) еще не узнал во время обучения.

Если нейронные сети имеют скрытые слои нейронов, которые не связаны напрямую с входным или выходным слоем, они называются «глубокими нейронными сетями». Глубокие нейронные сети могут иметь сотни тысяч или миллионы слоев нейронов. Это означает, что все более сложные проблемы можно решать с помощью так называемого глубокого обучения [8–10].

Обучение ИИ используется в самых разных областях: распознавание речи – в системах голосовой помощи, машинное зрение – в медицинской диагностике или распознавании лиц, семантическое распознавание речи позволяет приложениям для контекстно-зависимого перевода или чат-ботам самостоятельно генерировать осмысленные решения, распознавание образов: ИИ может изучать закономерности ошибок в автомобильной электронике на основе данных и сравнивать эти аномалии с поведением во время эксплуатации.

Его цель ни в коем случае не заменить человеческий труд, а, скорее, упростить и улучшить его. Для этого ИИ использует большие объемы различных данных из производства, чтобы интуитивно генерировать новые идеи. Например, он оптимизирует анализ первопричин проблем на производстве, может прогнозировать предстоящие сбои, позволяя принять превентивные меры до того, как сбой произойдет. Это происходит в режиме реального времени и может быть связано с сигналами тревоги при превышении определенных пороговых значений. В таких случаях операторы станков получают немедленные инструкции о том, как себя вести, чтобы снизить текущий риск повреждения, предотвратить несчастный случай на производстве или остановку производства. Более того, в этом сценарии ИИ может предоставлять контрмеры в виде инструкций оператору в режиме реального времени, что позволяет немедленно решать проблемы.

Еще одна сфера деятельности ИИ – устойчивое развитие. Помимо прочего, алгоритмы могут помочь выявить нерациональное потребление энергии или обнаружить отходы (например, лом). На этой основе решения искусственного интеллекта затем создают предложения по улучшению, реализация которых напрямую способствует сокращению выбросов CO₂ и повышению эффективности использования ресурсов.

В целом влияние автоматизации на занятость сильнее в производстве, чем в сфере услуг, из-за более высокой доли рутинных задач и меньшей зависимости от таких задач, как общение и обслуживание клиентов. Хотя технологии автоматизации, такие как роботы, уже являются обычным явлением в производстве, они только начинают получать более широкое распространение в сфере услуг из-за менее структурированной рабочей среды и менее повторяющегося содержания работы. Так или иначе, в некоторых секторах услуг, таких как логистика и транспорт, влияние автоматизации на занятость уже заметно, и оно начинает проявляться в других, таких как банковские и финансовые услуги. В середине 2022 года по данным Еврофонда оценки потерь рабочих мест, вызванных автоматизацией, варьировались от 10 до 15 %.

Результаты

Новые возможности трудоустройства и потребности в навыках возникнут в связи с внедрением и обслуживанием технологий автоматизации. Примерами являются разработчики роботов, интеграторы робототехнических систем, а также специалисты по программированию и обслуживанию роботов.

Ожидается, что автоматизация, особенно в небольших компаниях, изменит профили должностей, таких как руководители, бизнес-администраторы и менеджеры по персоналу. Сотрудники такого типа должны научиться управлять интеграцией технологий автоматизации на рабочем месте, а также использовать возможности и смягчать проблемы, связанные с изменениями в задачах и процессах.

Возникает вопрос о влиянии этой трансформации на людей: какое место они занимают в отрасли, в которой большое количество задач автоматизировано и выполняется машинами?

Поэтому в рамках Индустрии 5.0 основное внимание должно снова быть сосредоточено на людях. Таким образом, цифровая трансформация отрасли более тесно связана с социальным развитием.

Концепция «Индустрия 5.0» направлена на оптимизацию сотрудничества между людьми и роботами или интеллектуальными машинами. Люди намеренно добавляются в качестве дополнительного компонента к основам Индустрии 4.0 (автоматизация и эффективность).

Проанализируем новые роли людей, взаимодействующих с современной технической системой.

Во-первых, помимо непосредственно затронутых сотрудников этот процесс также затрагивает отделы ИТ и разработки, поскольку им приходится (совместно) разрабатывать, устанавливать, дорабатывать, обслуживать и поддерживать новые системы. В рамках нового процесса обеспечение качества также потребует выполнения различных задач. Кроме того, меняются предшествующие и последующие этапы производственного процесса – могут возникнуть новые задачи по мере того, как можно будет производить больше продукции.

Во-вторых, ожидается, что сотрудники помимо прочих задач, которые они теперь могут взять на себя, возьмут на себя еще и задачу по поддержке системы в неясных случаях. В пограничных случаях машина может попросить принять решение нажатием кнопки ввода. Сотрудники лучше всего подготовлены для выполнения этой задачи и могут наиболее надежно обеспечить быструю поддержку принятия решений.

В-третьих, это изначально облегчение, так как отпадает необходимость постоянной концентрации на конвейере с напряженным восприятием, а на экране отображаются только конкретные случаи. Опасения сокращения рабочих мест также следует принимать во внимание.

В-четвёртых, возможные действия, которые можно предпринять в связи с этим изменением, разнообразны. По мере увеличения производительности всей системы другие задачи, вероятно, станут более важными и, возможно, потребуют поддержки. С этой целью можно было бы заранее разработать новые сферы ответственности с участием сотрудников и провести учебные курсы, чтобы развеять страх потерять работу. Кроме того, сотрудников необходимо обучить работе в новой системе, которую они теперь будут поддерживать. Ротация должностей может улучшить социальное взаимодействие и разнообразие задач. Страхи и намерения сменить работодателя можно преодолеть с помощью дальновидного, прозрачного и комплексного процесса внедрения.

Рассмотрим ряд примеров. Гибридные системы комплектования, автономные мобильные складские роботы и люди-сборщики совместно выполняют рабочие задачи, это то, что даёт преимущества в стоимости и гибкости по сравнению с чисто ручными или автоматизированными системами. В транспортной логистике используются интеллектуальные «носители грузов». Они собирают информацию с помощью различных датчиков и делают ненужными действия по ручному поиску и регистрации. Автономные летающие дроны могут использоваться для замены ручной внутренней транспортировки материалов и трудоёмкой ручной инвентаризации на складе. Кроме того, интеллектуальные системы освещения во внутренней логистике могут не только экономить затраты на электроэнергию, но и привести к улучшению операционных процессов [11].

Таким образом, идея «Оператора 4.0», разработанная в 2016 году, предполагает другой подход к улучшению сотрудничества человека и машины, ориентированный на людей. Он основан на расширении навыков сотрудников с помощью технологических средств, а не на замене их роботами.

В результате была создана типология с восемью различными «операторами», которые могут сыграть важную роль в промышленном производстве в будущем (рис. 2).



Рис. 2. Типология промышленных операторов будущего
Fig. 2. Typology of industrial operators in the future

Такая типология может помочь найти новые роли для сотрудников посредством технологической поддержки в различных областях производственного процесса. В большинстве случаев технические средства уже доступны, например, устройства дополненной реальности для анализа проблем.

Этот аспект Индустрии 5.0 чрезвычайно ориентирован на людей, поскольку такие вещи, как сокращение цепочек поставок для снижения транспортных расходов и воздействия на окружающую среду, в первую очередь приносят пользу людям и окружающей среде. Сотрудники-люди имеют лучшие возможности для принятия решений, основанных на нарушениях в цепочке поставок из-за политических событий, стихийных бедствий и т. д. Для автономных систем непрактично и невыгодно полностью контролировать цепочку поставок, поскольку они оторваны от общества и глобальных событий. Только люди способны принимать целостные решения в нашей меняющейся среде за пределами завода.

Важно, чтобы сотрудник мог беспрепятственно переключаться между разными платформами и получать доступ к данным из разных источников [8].

Самыми большими препятствиями для внедрения технологий являются высокие инвестиционные затраты, а также интеграция и нехватка квалифицированных сотрудников.

Смещение фокуса сотрудничества человека и машины в пользу людей имеет еще один важный эффект: это поможет сделать рабочую среду более безопасной. Производственный сектор по-прежнему остается одним из секторов с самым высоким уровнем аварийности. В то же время особо сложные и повторяющиеся задачи, требующие больших физических нагрузок, могут выполнять роботы, что способствует снижению аварийности. Таким образом, можно в значительной степени предотвратить несчастные случаи на работе, которые происходят из-за невнимательности, усталости или недомоганий.

Устойчивое развитие уже является важной темой для Индустрии 4.0, например, в отношении потенциала автоматизированных процессов по снижению энергопотребления и контролю использования ресурсов. В контексте Индустрии 5.0 эта область становится еще более значимой.

Высококвалифицированные специалисты рынка труда Индустрии 5.0 должны обладать определенными навыками (рис. 3). Всемирный производственный форум собрал наиболее важные из этих навыков [12].

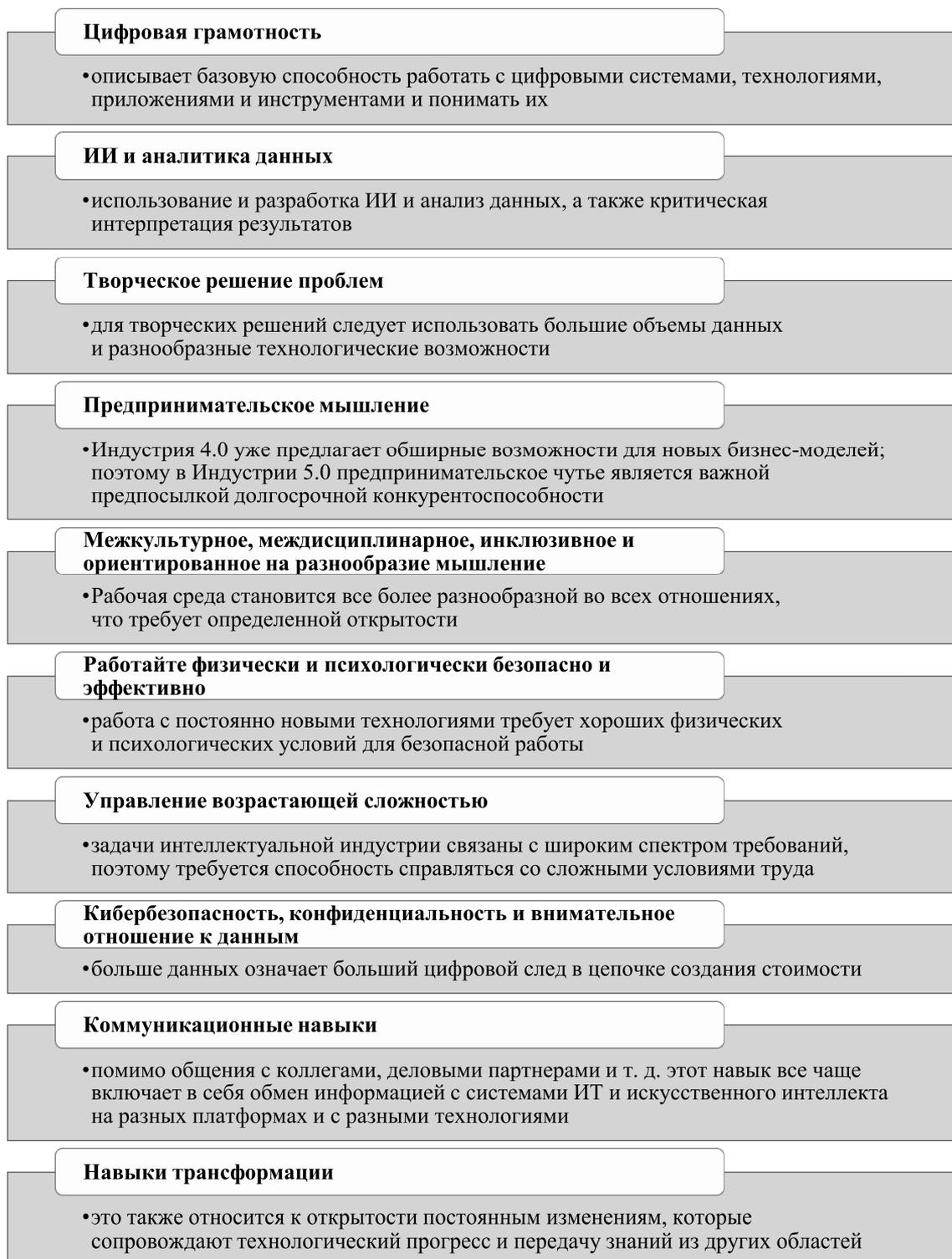


Рис. 3. Требуемые навыки работников промышленной сферы
Fig. 3. Required skills of industrial workers

В документе Комиссии ЕС отмечается, что, строго говоря, только четыре из этих навыков попадают непосредственно в категорию «цифровых навыков». Остальные, однако, вращаются вокруг так называемых мягких навыков, таких как креативность, открытость и гибкость.

Заключение

Таким образом, в то время как автоматизация берет на себя рутинные задачи, люди должны иметь возможность работать с передовыми технологиями. Программы повышения квалификации и переподготовки необходимы для обеспечения рабочей силы необходимыми цифровыми навыками, навыками решения проблем и способностью к адаптации [13].

Повышение квалификации – это концепция корпоративного обучения, в рамках которой сотрудникам предлагается расширить свои специальные знания путем приобретения углубленных знаний в нишевых областях или устранения пробелов в знаниях.

Переподготовка – это еще одна форма обучения внутри компании, при которой сотрудники могут получить дополнительную подготовку по ранее неизвестным квалификациям; это облегчает вход в различные отделы или рабочие зоны [14].

Правительствам и социальным партнерам необходимо продолжать свои усилия по повышению осведомленности и созданию культуры непрерывного обучения среди компаний, работников и общества [15], а также поддерживать пострадавшие предприятия и отдельных лиц путем консультирования, предоставления им адекватных предложений по обучению, финансирования образования и обучения.

Список литературы

1. Авдеева Е.А., Аверина Т.А., Бутырина Н.А. Информационные технологии – главный фактор ускорения экономического роста и глобального развития // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: тр. V Международ. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2021. С. 419–423.
2. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
3. Афанасьев А.А. Цифровизация промышленности: теоретические основы и методология исследования // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 8. С. 2537–2556. DOI: 10.18334/epp.13.8.118634
4. Мировой рейтинг цифровой конкурентоспособности. URL: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/rankings/world-digital-competitiveness-ranking/> (дата обращения: 16.01.2024).
5. Barkalov S.A., Averina T.A., Avdeeva E.A. Transformation of Organization Business Model in Conditions of Industry 5.0 // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 499–503. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349670
6. Smart control mechanisms for industrial enterprises / V.N. Burkov, O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Holloy // Applied Mathematics and Control Sciences. 2020. No. 1. P. 56–69. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04
7. Sotnikov D.V., Kravets O.Ja. A multi-module system for big data analysis based on machine learning // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS). Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference. Yelm, WA, USA, 2023. P. 198–205.
8. Лавренко Е.В., Мечикова М.Н. Цифровая трансформация промышленности: российский и зарубежный опыт // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2022. Т. 11, № 1. С. 47–52. DOI: 10.24412/2225-8264-2022-1-46-51
9. Каширина И.Л., Азарнова Т.В., Бондаренко Ю.В. Разработка методов оценки эффективности человеческих ресурсов на основе алгоритмов глубокого обучения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2 (86). С. 156–166.
10. Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS. URL: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kuenstliche-intelligenz.html>.

11. Медякова Е.М., Стрельцов Г.Р. Цифровизация мирового рынка услуг // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. ISSN 1999-2645. № 3 (75). Номер статьи: 7503. Дата публикации: 25.07.2023. URL: <https://eee-region.ru/article/7503/> DOI: 10.24412/1999-2645-2023-375-23

12. World Manufacturing Forum 2022. URL: <https://worldmanufacturing.org/activities/world-manufacturing-forum-2022>.

13. Давыдова Т.Е., Авдеева Е.А. Конкурентоспособность и развитие человеческого потенциала в системе взаимодействия вузов и работодателей // Экономика и предпринимательство. 2018. № 1 (90). С. 668–671.

14. Давыдова Т.Е. Особенности трансформации образовательной деятельности университетов в цифровой экономике // Механизм реализации стратегии социально-экономического развития государства. Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции. Махачкала, 2023. С. 173–176.

15. Barkalov S., Avdeeva E., Averina T. Features of the Lifelong Learning Concept Implementation // Proceedings – 2023 3rd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2023. 2023. P. 79–81 DOI: 10.1109/TELE58910.2023.10184367

References

1. Avdeeva E.A., Averina T.A., Butyrina N.A. [Information Technology Is a Major Factor in Accelerating Economic Growth and Global Development]. In: *Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh: trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modeling and High-Tech Information Technologies in Technical and Socio-Economic Systems: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk; 2021. P. 419–423. (In Russ.)

2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)

3. Afanasev A.A. Digitalization of industry: theoretical foundations and research methodology. *Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(8):2537–2556. (In Russ.) DOI: 10.18334/epp.13.8.118634

4. World Digital Competitiveness Ranking. Available at: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/rankings/world-digital-competitiveness-ranking/> (accessed 01/16/2024).

5. Barkalov S.A., Averina T.A., Avdeeva E.A. Transformation of Organization Business Model in Conditions of Industry 5.0. In: *2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, Russian Federation; 2023. P. 499–503. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349670

6. Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Smart control mechanisms for industrial enterprises. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020(1):56–69. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04

7. Sotnikov D.V., Kravets O.Ja. A multi-module system for big data analysis based on machine learning. *Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS). Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference*. Yelm, WA, USA; 2023. P. 198–205.

8. Lavrenko E.V., Mechikova M.N. Digital transformation of industry: Russian and foreign experience. *Herald of Siberian institute of business and information technologies*. 2022;11(1):47–52. (In Russ.) DOI: 10.24412/2225-8264-2022-1-46-51

9. Kashirina I.L., Azarnova T.V., Bondarenko Yu.V. Development of methods for evaluating the effectiveness of human resources based on deep learning algorithms. *Engineering Journal of Don*. 2022;2(86):156–166. (In Russ.)

10. Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS. Available at: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kuenstliche-intelligenz.html>.

11. Medyakova E.M., Streltsov G.R. Digitalization of the global services market. *Regional economy and management: electronic scientific journal*. ISSN 1999-2645. No. 3 (75). Art. no. 7503. Date issued: 25.07.2023. (In Russ.) Available at: <https://eee-region.ru/article/7503/> DOI: 10.24412/1999-2645-2023-375-23

12. World Manufacturing Forum 2022. Available at: <https://worldmanufacturing.org/activities/world-manufacturing-forum-2022>.

13. Davydova T.E., Avdeeva E.A. Competitiveness and human development in the system of interaction between universities and employers. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2018;1(90):668–671. (In Russ.)

14. Davydova T.E. Features of transformation of educational activities of universities in the digital economy. In: *Mekhanizm realizatsii strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya gosudarstva. Sbornik materialov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mechanism for Implementing the Strategy of Socio-economic Development of the State. Collection of Materials of the XV International Scientific and Practical Conference]. Makhachkala; 2023. P. 173–176. (In Russ.)

15. Barkalov S., Avdeeva E., Averina T. Features of the Lifelong Learning Concept Implementation. In: *Proceedings – 2023 3rd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2023*. 2023. P. 79–81 DOI: 10.1109/TELE58910.2023.10184367

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@vgasu.vrn.ru.

Авдеева Елена Александровна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; avdeeva_ea@mail.ru.

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Калинина Наталия Юрьевна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ka_nat@bk.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@vgasu.vrn.ru.

Elena A. Avdeeva, Cand. Sci. (Econ), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; avdeeva_ea@mail.ru.

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Natalia Yu. Kalinina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ka_nat@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 03.03.2024

The article was submitted 03.03.2024

О МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАКУПКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И БЮДЖЕТНОЙ КОНКУРЕНЦИИ ШКОЛ

А.В. Щепкин¹, av_shch@mail.ru
М.П. Лихолип², m.likholip@phystech.edu
А.Д. Богданов², andrey.bogdanov@phystech.edu

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. Образовательные учреждения регулярно приобретают служебное и педагогическое оборудование для обеспечения качественного образовательного процесса. В условиях ограниченного бюджета и конкуренции между учреждениями становится важным оптимальное распределение ресурсов и эффективное управление закупками. Работа развивает подходы к применению теории игр для моделирования закупок в образовательной сфере. В первой части рассматривается обобщение одноэтапных аукционов лотов закупок на случай неоднородной информированности участников. Приобретенные знания позволяют участникам снизить неопределенность результатов закупок и обойти более сильных участников рынка с более выгодными предложениями. В частности, определена оптимальная стратегия для случая информированности только одного игрока и количественный порядок нивелирования нежелательного преимущества путем включения дополнительных игроков. Во второй части работы рассматриваются механизмы долговременной бюджетной конкуренции между школами. Для исследования данной постановки используются широко известные модели Рубенштейна, а также Бэрона и Фереджона из теории игр. Проведена предметная аналогия между конкуренцией и многостадийными торгами, определены ключевые параметры, определяющие результаты соперничества. **Цель работы:** оценить применимость методов моделирования для сферы образования. **Материалы и методы.** Для моделирования используется математический аппарат динамических игр, включающий методы вероятностного моделирования, теории игр и оптимизации. Определяющим критерием принятия решения игроком служит наибольшая полезность, рассчитываемая на основании доступной информации. Вывод результатов моделирования выполняется аналитически посредством оптимизации с учетом дисконтирования функции полезности во времени. **Результаты.** Ценность работы представляет предметная интерпретация моделей теорией игр для управления в сфере образования. Разбор модельных ситуаций формирует представление о поведении агентов при регулировании рынка закупок и определение их бюджетирования. **Заключение.** Проведен анализ моделей теории игр применительно к сфере образования. Показано, что степень информированности игроков о базовых функциях может значительно влиять на их решения и итог закупок.

Ключевые слова: школьное образование, конкуренция, принятие решений, олигополия, монополия, аукцион, теория игр

Для цитирования: Щепкин А.В., Лихолип М.П., Богданов А.Д. О моделировании закупки образовательного оборудования и бюджетной конкуренции школ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 97–106. DOI: 10.14529/ctcr240209

PROCUREMENT OF EDUCATIONAL EQUIPMENT AND BUDGET COMPETITION MODELING

A.V. Shchepkin¹, av_shch@mail.ru

M.P. Likhonip², m.likholip@phystech.edu

A.D. Bogdanov², andrey.bogdanov@phystech.edu

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. Educational establishments regularly acquire administrative and pedagogical equipment to ensure a quality educational process. In the context of limited budgets and competition among institutions, optimal resource allocation and efficient procurement management become crucial. This study builds upon approaches by applying game theory to model procurement in the educational sector. The first part extends single-stage auction models of procurement to account for heterogeneous participant information. Acquired knowledge enables participants to reduce uncertainty in procurement outcomes and outmaneuver stronger market participants with more favorable offers. Specifically, an optimal strategy is identified for the scenario where only one player possesses information, along with a quantitative order of neutralizing the undesired advantage through additional player inclusion. The second part of the study examines mechanisms of long-term budgetary competition among schools. Well-known Rubinstein, Baron, and Ferejohn game theory models are employed to investigate this setup. A substantive analogy between competition and multi-stage negotiations is drawn, and key parameters determining competitive outcomes are delineated. **The purpose of the work** is to evaluate the applicability of game theory models. **Materials and methods.** For modeling, the mathematical apparatus of dynamic games is used, including methods of probabilistic modeling, game theory and optimization. The determining criterion for the decision of the players is the greatest utility, calculated solely based on available information. Results of the modeling are performed analytically through optimization, considering the discounting of the utility function over time. **Results.** Novelty of work is coupled with domain interpretation of game theory models. Modeling allows predicting agents behavior under the regulation of the procurement market and the definition of their budgeting. **Conclusion.** The analysis of models of game theory in relation to the field of education is accomplished. It is shown that the degree of awareness of the players about the value functions can significantly influence their decisions and the results of procurement.

Keywords: school education, competition, decision-making, oligopoly, monopoly, auction theory, game theory

For citation: Shchepkin A.V., Likhonip M.P., Bogdanov A.D. Procurement of educational equipment and budget competition modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(2): 97–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240209

Введение

В работе [1] проведено моделирование процесса конкуренции поставщиков за закупку в случае максимизации прибыли и выручки. Предполагалось, что большая часть закупок в образовательной сфере является закрытым аукционом первой цены [2–4]. Составлен прогноз скидок поставщиков при произвольном количестве участников аукциона и с учетом интереса поставщика в максимизации прибыли или выручки. Работа показала, что в условиях совершенной конкуренции участники аукциона будут предлагать услуги по ее себестоимости.

Цель текущей работы – разобрать случаи частичной и полной информированности о предложениях поставщиков. Также автор в целях расширения темы моделирования организации экономических взаимоотношений в образовательных процессах опишет случай последовательного разделения бюджета между образовательными организациями и конкуренции между школами за бюджет муниципалитета/региона.

1. Обзор

Объем рынка государственных учреждений, реализующих общеобразовательные программы, составляет миллиарды рублей. Реформы бюджетирования образовательных организаций позволяют совершенствовать профессиональную компетенцию молодых кадров, создавать новые педагогические практики, повышать удовлетворенность работой педагогов и руководителей образовательного процесса.

Закупки в сфере образования могут осуществляться через конкурс согласно Федеральным законам № 239 и 44 и региональным нормативным ограничениям. Закупка осуществляется либо напрямую, либо через специальные механизмы государственных закупок. Чаще всего в закупку вступают несколько ключевых поставщиков, которые конкурируют за поставку, предлагая наименьшую цену.

Основным источником финансирования образовательных учреждений в настоящее время являются бюджетные ассигнования, рассчитанные на основе стоимости обучения обучающегося [5, 6]. Согласно ФГОС в стоимость обучения включаются:

- форма обучения;
- тип образовательной организации;
- сетевая форма реализации образовательных программ, образовательных технологий;
- специальные условия получения образования обучающимися с ОВЗ;
- обеспечение дополнительного профессионального образования педагогическим работникам;
- обеспечение безопасных условий обучения и воспитания;
- охрана здоровья обучающихся;
- другие особенности.

Распределение бюджета согласно [7] выполняется на трех уровнях:

- федеральный;
- региональный;
- муниципальный.

Объем субвенции, передаваемой местному бюджету из бюджета субъекта РФ на реализацию государственного стандарта, задается формулой

$$\Phi_{Гс} = N_c \cdot Y_c + N_r \cdot Y_r,$$

где N_c – региональный расчетный подушевой норматив для сельской местности;

N_r – региональный расчетный подушевой норматив для городской местности;

Y_c – количество сельских учащихся в данном муниципальном образовании;

Y_r – количество городских учащихся в данном муниципальном образовании.

Объем средств, выделяемых образовательному учреждению, рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi = N \cdot П \cdot Y,$$

где N – региональный расчетный подушевой норматив;

Y – число обучающихся в образовательном учреждении;

$П$ – поправочный коэффициент, установленный для данного образовательного учреждения.

Образовательное учреждение самостоятельно определяет распределение на материально-техническое обеспечение и заработную плату работников образовательного учреждения, в том числе надбавки и доплаты к должностным окладам.

Таким образом, школа конкурирует за бюджет определенного уровня в зависимости от уровня подчинения школы.

Объем финансирования конкретных образовательных учреждений может быть пересмотрен путем корректировки поправочного коэффициента.

Выделяют также дополнительные источники финансирования:

- платные дополнительные образовательные услуги;
- предпринимательская деятельность;
- налоговые льготы;
- средства спонсоров;
- добровольные пожертвования родителей.

Среди них можно выделить родительскую плату за услуги учреждений в сфере обучения и оздоровления детей, благотворительность и выручку школьных столовых.

Заметим, что независимо от количества привлеченных средств бюджетное финансирование образовательного учреждения не снижается.

2. Функция полезности поставщика

Будем считать, что поставщики конкурируют за бюджет на сумму K_0 и предоставляют школе скидки ΔM для победы в закупке [4, 8]. При этом поставщики несут издержки как постоянные FC , так и относительные p , пропорционально зависящие от бюджета K_0 [1]. Тогда прибыль поставщика будет равна

$$\pi = K_0 - FC - pK_0 - \Delta M = (1 - p)K_0 - FC - \Delta M. \quad (1)$$

Функция полезности [9] поставщика будет являться функцией прибыли, так как основной задачей поставщика будет являться максимизация его прибыли:

$$U = \pi.$$

Определим также базовую функцию P и выручку TR поставщика:

$$P = (1 - p)K_0 - FC; \quad (2)$$

$$TR = K_0 - \Delta M. \quad (3)$$

Значение базовой функции зависит от способности поставщика к снижению относительных и постоянных издержек, определяет его конкурентность. В условиях равной скидки поставщик с большим значением базовой функции получит большую прибыль.

Выручка так же, как и прибыль, может быть оптимизируемой функцией для поставщиков – функцией полезности. Малые игроки, заключая сделки, ориентируются на максимизацию прибыли. Крупные, если сделка приносит неотрицательную прибыль, – на максимизацию выручки. Соответственно, для крупных поставщиков функцией полезности будет являться функция выручки:

$$\text{малые игроки: } U = \pi \rightarrow \max, \pi > 0;$$

$$\text{крупные игроки: } U = TR \rightarrow \max, \pi \geq 0.$$

В экспертной постановке критерием крупного игрока в Российской Федерации можем считать ежегодную выручку более 400 млн рублей [10].

В работе [1] разобран случай закрытого аукциона, в котором значение базовой функции поставщика неизвестно прочим игрокам. В условиях аукциона закупку выигрывает поставщик с наибольшей скидкой на лот [3].

При моделировании процесса конкуренции предполагаем, что поставщик считает скидки прочих игроков равновероятными. При принятии собственного решения он подбирает скидку, исходя из максимизации математического ожидания полезности. В условиях n поставщиков, где $n = k + m$, где k – число поставщиков, максимизирующих прибыль, а m – число поставщиков, максимизирующих выручку, получаем:

$$\Delta M_i^{(k)} = \frac{P_i \cdot (n-1)}{n}; \quad (4)$$

$$\Delta M_i^{(m)} = \frac{K_0 \cdot (n-1)}{n} \text{ при } P_i - \frac{K_0 \cdot (n-1)}{n} \geq 0, \text{ иначе } \Delta M_i^{(m)} = P_i. \quad (5)$$

Заметим, что скидки игроков с ростом числа участников аукциона стремятся к их базовой функции. То есть лоты в условиях закрытого аукциона при достаточном числе участников будут продаваться по себестоимости товара.

3. Полная информированность

Рассмотрим случай n поставщиков, в котором все игроки максимизируют прибыль и осведомлены о значениях базовой функции друг друга при фиксированном бюджете K_0 [11, 12]. Для удобства пронумеруем игроков по возрастанию значения базовой функции P_i .

Заметим, что в заданных условиях игрок n может быть уверен, что при выставлении скидки $\Delta M_n > P_{n-1}$ он гарантированно выиграет аукцион. Тем не менее в целях максимизации математического ожидания прибыли он может быть заинтересован в выставлении меньшей скидки.

Игрок n обладает информацией о базовой функции прочих игроков, но не знает об их стратегиях выставления скидки. В условиях независимого принятия решения игроками вероятность победы в закупке $p(\Delta M_n > \Delta M_i)$ ($i = 1, \dots, (n - 1)$) при $\Delta M_n < P_i$ равна $\Delta M_n / P_i$, игрок i с равной вероятностью выставляет скидку в меру своей базовой функции P_i , и 1 при $\Delta M_n \geq P_i$, конкурирующий поставщик не станет заключать сделку с отрицательной прибылью (см. рисунок).

Следовательно, математическое ожидание прибыли игрока n в введенных обозначениях запишется как

$$E\pi_n(\Delta M_n) = (P_n - \Delta M_n)p(\Delta M_n > \Delta M_{1,\dots,n-1}) = \\ = P_n - \Delta M_n)p(\Delta M_n > \Delta M_1) \dots p(\Delta M_n > \Delta M_{n-1}). \quad (6)$$

Полученная функция непрерывна, но не является гладкой от ΔM_n . Имеются точки разрыва производных при значениях аргумента равных P_i .

Предложим алгоритм поиска оптимальной скидки ΔM_n для игрока n . Разделим поиск на два логических этапа.

1. Определяем аргументы, соответствующие условному максимуму, на каждом из интервалов гладкости.

На интервале $\Delta M_n \in (P_{i-1}, P_i)$ ($i=1, \dots, (n-1)$, $P_0 = 0$) запишется как

$$E\pi_n = (P_n - \Delta M_n) \frac{\Delta M_n}{P_i} \dots \frac{\Delta M_n}{P_{n-1}}. \quad (7)$$

Оптимальное значение скидки соответствует условному локальному экстремуму на множестве $\Delta M_n \in (P_{i-1}, P_i)$.

Выполняем дифференцирование по ΔM_n правой части уравнения (7) и определяем максимум на интервале:

$$\Delta M_n^{(i)} = \operatorname{argmax}_{\Delta M_n} E\pi_n = P_n(n-i)/(n-i+1) \text{ при } P_i > P_n(n-i)/(n-i+1) > P_{i-1}, \\ \Delta M_n^{(i)} = P_{i-1}, \text{ при } P_n(n-i)/(n-i+1) < P_{i-1}, \\ \Delta M_n^{(i)} = P_i, \text{ при } P_i > P_n(n-i)/(n-i+1). \quad (8)$$

2. Находим оптимальное значение путем нахождения максимума конечного числа локальных максимумов, полученных на шаге 1. Оптимальное значение скидки $\Delta M_n^{(opt)}$ задается как

$$\Delta M_n^{(opt)} = \operatorname{argmax}_{\Delta M_n^{(1)}, \dots, \Delta M_n^{(n)}} E\pi_n. \quad (9)$$

Заметим, что оптимальный вид скидки $\Delta M_n^{(opt)}$ в случае полной информированности будет определяться не только значением базовой функции поставщика P_n , но и соотношением между P_1, \dots, P_n .

Опишем применение алгоритма для игрока i . Вероятность победы в закупке игрока i задается как

$$p(\Delta M_i > \Delta M_j) = \frac{\Delta M_i}{P_j}, \text{ если } i < j; \\ p(\Delta M_i > \Delta M_j) = \Delta M_i/P_j \text{ при } \Delta M_i < P_j \text{ и } p(\Delta M_i > \Delta M_j) = 1 \text{ при } \Delta M_i \geq P_j, \text{ если } i > j.$$

Аналогично математическое ожидание прибыли игрока i запишется как

$$E\pi_i(\Delta M_i) = (P_i - \Delta M_i)p(\Delta M_i > \Delta M_{1,\dots,i-1,i+1,\dots,n}) = \\ = (P_i - \Delta M_i)p(\Delta M_i > \Delta M_1) \dots p(\Delta M_i > \Delta M_n).$$

$E\pi_i(\Delta M_i)$ имеет точки разрыва производных в P_1, \dots, P_{i-1} . Шаги оптимизационного алгоритма для игрока i аналогичны поставщику n . На первом этапе выделяются максимумы на интервалах гладкости $\Delta M_i \in (0, P_1), (P_1, P_2), \dots, (P_{i-1}, P_i)$. На втором выполняется поиск оптимального решения по конечному набору локальных максимумов, полученных на шаге 1:

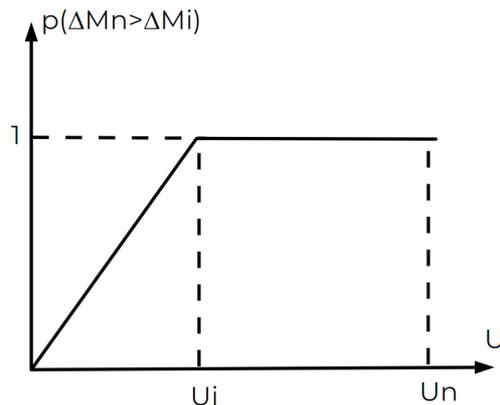
$$\Delta M_i^{(opt)} = \operatorname{argmax}_{\Delta M_i^{(1)}, \dots, \Delta M_i^{(i-1)}} E\pi_i.$$

Подробно разберём случай двух игроков для интерпретации результатов. Игрок с большим значением базовой функции получит номер 2 и задаст скидку:

$$\Delta M_1 = P_1/2, \text{ при } P_1/2 < P_2, \text{ иначе } \Delta M_1 = P_2. \quad (10)$$

То есть в условиях максимизации прибыли и достаточно конкурентных игроков имеем случай, аналогичный закрытому аукциону. Если поставщик обладает значительным преимуществом, то выставляет скидку, равную значению базовой функции более слабого конкурента.

Обратим внимание, что в текущей постановке задачи поставщики предполагали стратегию прочих игроков неизвестной. При максимизации выигрыша в наихудшей из возможных ситуаций получаем тривиальный вывод, что поставщик n предоставит скидку P_{n-1} , таким образом, упуская выгоду от более рискованного предложения.



Вероятность предоставить для поставщика n большую скидку, чем конкурент i
Probability for supplier n to provide greater discount than competitor i

4. Частичная информированность поставщиков

Для разбора случая неполной информированности будем считать, что один из поставщиков осведомлен о значениях базовой функции всех прочих игроков при заявленном бюджете K_0 . При этом прочие поставщики не знают, что их базовая функция известна.

Согласно выводам работы [1] неинформированные игроки предоставят скидки согласно своему типу: (k) – максимизирующие прибыль, (m) – максимизирующие выручку:

$$\Delta M_i^{(k)} = \frac{P_i(n-1)}{n};$$

$$\Delta M_i^{(m)} = \frac{K_0(n-1)}{n} \text{ при } P_i - \frac{K_0(n-1)}{n} \geq 0, \text{ иначе } \Delta M_i^{(m)} = P_i.$$

Информированный игрок, осознавая стратегии своих оппонентов, предложит скидку, несущественно превышающую максимальную скидку прочих игроков:

$$\Delta M_{opt}^{informed} = \max(\Delta M^{(m)}, \Delta M^{(k)}) + \varepsilon, \quad (11)$$

где ε – малая неотрицательная величина. Уравнение выполняется, если базовая функция $p^{informed} > \Delta M_{opt}^{informed}$.

Заметим, что прибыль информированного игрока возрастает совместно со значением его базовой функции и убывает с ростом числа игроков. По лотам с малым числом поставщиков игрок с наибольшим значением базовой функции может приобретать значительную выгоду от информированности. Напротив, малоконкурентные игроки в условиях значительного числа конкурентов не смогут предложить выгодную для них скидку независимо от их знаний.

5. Модель торгов между двумя школами за бюджет

Среди бюджетных ассигнований, согласно [7], помимо основных также есть и стимулирующие выплаты для руководителей образовательных учреждений. Их распределение выполняется органом местного самоуправления образовательных организаций на основе форм независимой оценки качества образования. Решение о размере премирования выносится в соответствии с разработанным нормативным актом органа местного самоуправления.

В рамках раздела мы приведем описание подхода из теории игр для моделирования раздела ограниченной суммы между двумя школами. Раздел будет проходить в ходе последовательных торгов, определяющих пропорцию раздела бюджета, который выделит надзирающий орган. Таким образом, мы определим места пристального внимания при составлении нормативных актов, определим качества игроков, позволяющие им приобрести большую долю при споре.

Для исследования раздела между двумя игроками используется модель последовательных торгов Ариэля Рубенштейна [2, 13, 14]. Согласно модели участники последовательно предлагают долю раздела заявленного бюджета [13]. Если оппонент не согласен с предложением, он его отклоняет и выдвигает свой способ раздела. Игроки заинтересованы в скорейшем разрешении спора и потому обладают коэффициентом дисконта $\delta \in (0,1)$, определяющим, насколько ценно для игрока время, затраченное на переговоры [15]. Таким образом, функция полезности игрока спустя ход U_{T+1} составляет δU_T при равных условиях раздела.

Изначально рассмотрим ситуацию торгов между двумя игроками. Функция полезности с учетом дисконтирования на временном шаге T в отсутствие раздела для игроков задается как

$$U_1^{(T)} = \delta_1^{T-1} r_T; \quad (12)$$

$$U_2^{(T)} = \delta_2^{T-1} (1 - r_T), \quad (13)$$

где r_T – доля раздела первого игрока, предложенная на шаге T .

Оптимальная стратегия для игрока – предлагать оппоненту минимальный раздел, на который он согласится:

$$1 - r_T \geq \delta_2(1 - r_{T+1}); \quad (14)$$

$$\delta_1 r_T \geq r_{T+1}. \quad (15)$$

Перепишем неравенства и получим:

$$1 - \delta_2(1 - r_{T+1}) \leq r_T \leq r_{T+1} / \delta_1;$$

$$1 - \frac{1-r_T}{\delta_2} \leq r_{T+1} \leq r_T \delta_1.$$

Получаем неравенства на r_T, r_{T+1} :

$$r_T \leq \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}; \quad 1-r_T \geq \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2},$$

$$r_{T+1} \geq \frac{\delta_1(1-\delta_2)}{1-\delta_1\delta_2}; \quad 1-r_{T+1} \leq \frac{1-\delta_1}{1-\delta_1\delta_2}.$$

В заданных условиях игрок 1 предлагает раздел $r_1 = \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}$ и соглашается не менее чем на $r_2 \geq \frac{\delta_1(1-\delta_2)}{1-\delta_1\delta_2}$.

Заметим, что сторона, выдвигающая предложение, имеет преимущество в величину дисконта. Также можем сделать логичный вывод, что с ростом собственного коэффициента дисконта величина раздела увеличивается. При росте дисконта противника – уменьшается. Таким образом, результат спора определяется инициативностью и терпеливостью участников.

Также полученная модель может быть использована для описания взаимодействия в сфере образования. Так, управляющие лица, которыми могут быть представлены как муниципальные органы, так и министерства, используют преимущество первого хода, задавая правила распределения бюджета, определяющие размер ассигнования. Также с целью снижения коэффициента дисконта подрядчика – его возможности для обсуждения размеров бюджетирования – задаются сжатые сроки на подачи заявлений, формирования отчетов, необходимых для получения финансирования. Таким образом, управляющий орган получает возможность распределять ограниченные ресурсы согласно делегированной ему стратегии бюджетирования.

6. Модель торгов между n игроками

Для случая торгов между N участниками используется модель Бэрона и Фереджона [2, 14, 16]. Право выдвигать предложение определяются случайно с равной вероятностью для каждого игрока $\frac{1}{N}$. Решение о разделе принимается, если K игроков его поддерживают, иначе право на голосование вновь случайно распределяется между игроками.

Полное решение в предположениях марковости и симметричности решения описано в [2] (более общий случай доступен в [16]). Автор предлагает ввести две контрольные величины для игрока: R – ожидаемый выигрыш игрока, предлагающего раздел; r – ожидаемый выигрыш игрока, не предлагающего раздел. Тогда с вероятностью $\frac{1}{N}$ игрок будет предлагать дележ и получит выигрыш R , иначе с вероятностью $\frac{N-1}{N}$ его выигрыш составит r . Так что для того, чтобы игрок согласился на предлагаемый дележ в данный момент времени, необходимо, чтобы ему предложили как минимум $\delta(\frac{1}{N}R + r\frac{N-1}{N})$.

Тогда сформированное предложение будет иметь вид:

$$1 - (K-1)\delta(R\frac{1}{N} + r\frac{N-1}{N}) - \text{предлагающему};$$

$$\delta(R\frac{1}{N} + r\frac{N-1}{N}) - K-1 \text{ игрокам, которые должны одобрить раздел};$$

$$0 - \text{каждому из оставшихся } N-K \text{ игроков}.$$

При этом все $N-1$ игроков должны иметь одинаковую вероятность быть включенными в число $K-1$ игроков, которые одобряют дележ: $(K-1)/(N-1)$. Приравнявая ожидаемый выигрыш к предложениям, получаем систему:

$$R = 1 - (K-1)\delta(R\frac{1}{N} + r\frac{N-1}{N});$$

$$r = \delta\frac{K-1}{N-1}(R\frac{1}{N} + r\frac{N-1}{N}).$$

Решая систему, получаем R и r :

$$R = \frac{N-\delta(K-1)}{N}; \tag{16}$$

$$r = \frac{\delta(K-1)}{N(N-1)}. \tag{17}$$

Тогда выигрыши игроков составят:

$$\frac{N-\delta(K-1)}{N} - \text{предлагающему};$$

$$\frac{\delta}{N} - K-1 \text{ игрокам, которые получили право одобрить раздел};$$

$$0 - \text{каждому из оставшихся } N-K \text{ игроков}.$$

Приведем выводы, которые следуют из заявленной модели. Преимуществом при разделении ресурсов обладает сторона, выдвигающая решение. Для привлечения сторонников она выдвигает предложения, выгода которых обладает стохастической природой. Таким образом, возможна агитация каждого участника без явного формирования выгодополучателей – сговора.

Заметим, что выгода предлагающей стороны убывает с числом K и коэффициентом дисконтирования δ . При этом равный раздел между сторонами возможен лишь при $K = N$ и $\delta = 1$.

Модель Бэрона и Фереджона удобна для описания органов самоуправления. Опишем её применение для объединения школ муниципалитета, имеющих в среднем равные успехи в образовании. Определение руководителя самоуправления согласно постановке задачи имеет стохастическую природу – результаты образовательных учреждений в среднем равны. Таким образом, каждый представитель школы имеет равные шансы на распределение премиального бюджета. Одним из целевых инструментов распределения в сфере образования являются олимпиады. Премии выделяются школам с наибольшим числом победителей. В условиях равной успеваемости воспитанников школ статус победителя также равновероятен для всех участников. Для организации события руководитель использует делегированный бюджет, приобретая оборудование, дополнительно стимулируя сотрудников своего учебного заведения на составление заданий и присутствие на мероприятии, рекламируя олимпиаду. Таким образом, создаются все необходимые компоненты модели Бэрона и Фереджона:

- равные возможности на предложение раздела;
- стохастическая природа распределения бюджета между игроками для легитимизации своего предложения;
- преимущество руководителя раздела.

Заключение

В работе разобраны случаи аукциона при частичной и полной информированности игроков о значениях функций полезности прочих игроков. Показано, что для случая полной информированности в условиях достаточно конкурентного рынка скидка, предоставляемая заказчику, не отличается от закрытого аукциона. При привлечении к аукциону достаточного количества равных поставщиков игроки будут выдвигать предложения по себестоимости независимо от их осведомленности. Ситуация частичной информированности может различаться в зависимости от значения функции полезности поставщика. Для приобретения выгоды информированному поставщику необходимо быть конкурентным и участвовать в сделках с малым числом игроком. В противном случае дополнительная информация не даёт преимуществ. Также разобран случай распределения бюджета в ходе последовательных торгов между участниками. Приведены модели, описывающие раздел между двумя и n -игроками. Разобраны способы применения моделирования для практик организации органов самоуправления и выделения финансирования. Показано, что в заданных условиях приобретает преимущество сторона, первая выдвигающая предположение и с большим терпением подходящая к разрешению спора.

Список литературы

1. Богданов А.Д., Колобов Д.В., Щепкин А.В. Модели процессов закупки материально-технического обеспечения школ и конкуренции между поставщиками // Проблемы управления. 2024. № 1. С. 35–42. DOI: 10.25728/pu.2024.1.4
2. Шагин В.Л. Теория игр: учеб. и практикум для академ. бакалавриата. М.: Юрайт, 2014. 223 с. (Авторский учебник).
3. McAfee R.P., McMillan J. Auctions and Bidding. *Journal of Economic Literature*. 1987. Vol. 25 (2). P. 699–738.
4. Механизмы управления. Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: учеб. пособие / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко и др. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2013. 216 с.
5. Федеральный закон Российской Федерации от 10 апреля 2000 г. № 51-ФЗ «Об утверждении Федеральной программы развития образования»; в редакции от 03.08.2018.
6. Федеральный закон Российской Федерации от 8 мая 2010 года № 83-ФЗ «О внесении изме-

нений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с совершенствованием правового положения государственных (муниципальных) учреждений».

7. Письмо Министерства образования и науки РФ от 13 сентября 2006 г. № АФ-213/03 «О подготовке и направлении модельных методик».

8. Nash J.F. The bargaining problem // *Econometrica*. 1950. Vol. 18 (2). P. 155–162.

9. Debreu G. Representation of a Preference Ordering by a Numerical Function // *Decision Processes* / M. Thrall, R.C. Davis, C.H. Coombs (Eds.). John Wiley and Sons, New York, 1954. P. 159–165.

10. Федеральный закон Российской Федерации от 24.07.2007 № 209-ФЗ; в ред. от 12.12.2023 «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации».

11. Persico N. Information acquisition in auctions // *Econometrica*. 2000. Vol. 68 (1). P. 135–148.

12. Bergemann D., Pesendorfer M. Information structures in optimal auctions // *Journal of Economic Theory*. 2007. Vol. 137 (1). P. 580–609. DOI: 10.1016/2007.02.001

13. Rubinstein A. Perfect equilibrium in a bargaining model // *Econometrica*. 1982. Vol. 50 (1). P. 97–109. DOI: 10.2307/1912531

14. Fréchette G.R., Kagel J.H., Morelli M. Gamson's Law versus non-cooperative bargaining theory // *Games and Economic Behavior*. 2005. Vol. 51 (2). P. 365–390. DOI: 10.1016/j.geb.2004.11.003

15. Bellman R. Dynamic programming // *Science*. 1966. Vol. 153 (3731). P. 34–37. DOI: 10.1126/science.153.3731.34

16. Eraslan H. Uniqueness of stationary equilibrium payoffs in the Baron–Ferejohn model // *Journal of Economic Theory*. 2002. Vol. 103 (1):11–30.

References

1. Bogdanov A.D., Kolobov D.V., Shchepkin A.V. Modeling the Procurement of School Equipment and Competition among Suppliers. *Control Sciences*. 2024;(1):35–42. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2024.1.4

2. Shagin V.L. *Teoriya igr: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Game Theory: Textbook and practical workbook for academic bachelor's degree]. Moscow: Yurayt Publ.; 2014. 223 p. (In Russ.)

3. McAfee R.P., McMillan J. Auctions and Bidding. *Journal of Economic Literature*. 1987;25(2): 699–738.

4. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. et al. *Mekhanizmy upravleniya. Upravlenie organizatsiy: planirovanie, organizatsiya, stimulirovanie, kontrol': uchebnoe posobie* [Mechanisms of management. Organization management: planning, organization, stimulation, control: textbook. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow: LENAND; 2013. 216 p. (In Russ.)

5. *Federal'nyy zakon ot 10 aprelya 2000 g. No. 51-FZ "Ob utverzhdenii Federal'noy programmy razvitiya obrazovaniya"*; v redaktsii ot 03.08.2018 [Federal Law of the Russian Federation of April 10, 2000 No. 51-FZ "On Approval of the Federal Education Development Program"; as amended on August 3, 2018]. (In Russ.)

6. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 8 maya 2010 goda No. 83-FZ "O vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii v svyazi s sovershenstvovaniem pravovogo polozheniya gosudarstvennykh (munitsipal'nykh) uchrezhdeniy"* [Federal Law of the Russian Federation of May 8, 2010 No. 83-FZ "On Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with Improving the Legal Status of State (Municipal) Institutions"]. (In Russ.)

7. *Pis'mo Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 13 sentyabrya 2006 g. No. AF-213/03 "O podgotovke i napravlenii model'nykh metodik"* [Letter from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated September 13, 2006, No. AF213/03 "On the Preparation and Submission of Model Methodologies"]. (In Russ.)

8. Nash J.F. The bargaining problem. *Econometrica*. 1950;18(2):155–162.

9. Debreu G. Representation of a Preference Ordering by a Numerical Function. In: *Thrall M., Davis R.C., Coombs C.H. (Eds.). Decision Processes*. John Wiley and Sons, New York; 1954. P. 159–165.

10. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 24.07.2007 No. 209-FZ; v red. ot 12.12.2023 "O razvitiy malogo i srednego predprinimatel'stva v Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law of the Russian Federation of July 24, 2007 No. 209-FZ "On the Development of Small and Medium-Sized Enterprises in the Russian Federation"]. (In Russ.)

11. Persico N. Information acquisition in auctions. *Econometrica*. 2000;68(1):135–148.

12. Bergemann D., Pesendorfer M. Information structures in optimal auctions. *Journal of Economic Theory*. 2007;137(1):580–609. DOI: 10.1016/2007.02.001
13. Rubinstein A. Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica*. 1982;50(1):97–109. DOI: 10.2307/1912531
14. Fréchet G.R., Kagel J.H., Morelli M. Gamson's Law versus non-cooperative bargaining theory. *Games and Economic Behavior*. 2005;51(2):365–390. DOI: 10.1016/j.geb.2004.11.003
15. Bellman R. Dynamic programming. *Science*. 1966;153(3731):34–37. DOI: 10.1126/science.153.3731.34
16. Eraslan H. Uniqueness of stationary equilibrium payoffs in the Baron–Ferejohn model. *Journal of Economic Theory*. 2002;103(1):11–30.

Информация об авторах

Щепкин Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; av_shch@mail.ru.

Лихолип Матвей Павлович, студент, стартап-студия технологизации образования, кафедра инновационной фармацевтики, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; m.likholip@phystech.edu.

Богданов Андрей Дмитриевич, аспирант, руководитель стартап-студии технологизации образования, кафедра инновационной фармацевтики, заведующий лабораторией нейротехнологий и человеко-машинного взаимодействия, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; andrey.bogdanov@phystech.edu.

Information about the authors

Alexander V. Shchepkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; av_shch@mail.ru.

Matvey P. Likholid, Student, Startup Studio of Technologization of Education, Department of Innovative Pharmaceuticals, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia; m.likholip@phystech.edu.

Andrey D. Bogdanov, Postgraduate student, Head of the Startup Studio for Technologization of Education, Department of Innovative Pharmaceuticals, Head of the Laboratory of Neurotechnology and Human-Machine Interaction, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia; andrey.bogdanov@phystech.edu.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.02.2024

The article was submitted 10.02.2024

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 331.108.26
DOI: 10.14529/ctcr240210

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КВАЛИФИКАЦИИ И ЛИЧНЫХ КАЧЕСТВ РУКОВОДЯЩЕГО СОСТАВА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ЕГО СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

О.В. Логиновский, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен актуальный подход формирования оценки квалификации и личных качеств работников и руководящего состава промышленного предприятия и его структурных подразделения, необходимый для формирования методологии соответствующих расчетов. **Целью работы** является создание методологии, определяющей последовательность и содержание процесса оценки квалификации и личностных качеств работников и руководителей промышленного предприятия, которая может быть использована для самых разнообразных предприятий промышленности и иной хозяйственной деятельности в отечественной практике бизнеса. **Материалы и методы.** Представленная в статье методика базируется на материалах количественных показателей деловых и личностных качеств работников и руководителей и методах оценки этих работников посредством набора необходимых для этого расчетных формул. **Результаты**, получаемые посредством использования представленной методологии, позволяют руководителям и работникам управлений или отделов кадров промышленных предприятий осуществлять весь комплекс оценки состава руководящих звеньев, отделов и всего высшего управленческого персонала промышленных предприятий вне зависимости от содержания их производственной деятельности. **Заключение.** Разработанная в статье методика оценки квалификации и личных качеств работников и руководящего состава промышленного предприятия является достаточно универсальной, вполне может способствовать повышению качества руководства производственных компаний и благодаря этому улучшить уровень управления промышленными предприятиями.

Ключевые слова: человеческие ресурсы, оценка квалификации, промышленное предприятие, руководящий состав

Для цитирования: Логиновский О.В. Методика оценки квалификации и личных качеств руководящего состава промышленного предприятия и его структурных подразделений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 2. С. 107–113. DOI: 10.14529/ctcr240210

Brief report
DOI: 10.14529/ctcr240210

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALIFICATIONS AND PERSONAL QUALITIES OF MANAGEMENT STAFF AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE AND ITS STRUCTURAL SUBDIVISIONS

O.V. Loginovskiy, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article considers the actual approach to the formation of the assessment of qualification and personal qualities of employees and management staff of an industrial enterprise and its structural subdivisions necessary for the formation of the methodology of relevant calculations. **Aim.** The purpose of the work is to create a methodology that determines the sequence and content of employees and managers qualification and personal qualities assessment, which can be used for a wide variety of industrial enterprises

© Логиновский О.В., 2024

and other economic activities in domestic business practice. **Materials and methods.** The method presented in the article is based on the materials of quantitative indicators of business and personal qualities of employees and managers and methods of evaluation of these employees through a set of calculation formulas necessary for this purpose. **Results.** The results obtained through the use of the presented methodology allow HR-managers and other managerial staff of industrial enterprises to carry out the whole complex of assessment of the composition of the management ranks, departments and all senior management personnel of industrial enterprises, regardless of the content of their production activities. **Conclusion.** The methodology of assessment of qualification and personal qualities of employees and management staff of an industrial enterprise developed in the article is quite universal, it may well contribute to improving the quality of management of manufacturing companies.

Keywords: human resources, qualification assessment, industrial enterprise, management staff

For citation: Loginovskiy O.V. Methodology for assessing the qualifications and personal qualities of management staff at an industrial enterprise and its structural subdivisions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(2):107–113. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240210

Введение

Для успешного функционирования любого промышленного предприятия чрезвычайно важно, чтобы руководители всех его управленческих звеньев снизу доверху возглавлялись компетентными профессионально образованными и имеющими успешный опыт в управлении руководителями. В этой связи огромное значение для эффективной работы имеют механизмы, алгоритмы и системы оценки руководящего персонала промышленного предприятия, а также и всех его работников. Разумеется, что все они должны быть нацелены на выявление совокупности личных качеств и соответствующих уровней компетентности для выполнения работ в рамках занимаемых должностей.

Вопросы эффективности работы персонала промышленных предприятий и иных организаций изложены в целом ряде научных работ, часть из которых в той или иной степени связана с тематикой данной статьи [1–15].

1. Состав, содержание и алгоритм расчета показателей оценки личностных и деловых качеств работников и руководящего состава промышленного предприятия

Своеобразную экспертизу личностных и деловых качеств работников следует осуществлять по набору показателей, группируемых по всем направлениям деятельности промышленного предприятия.

В числе анализируемых качеств работников особо важно учитывать такие, как опыт самостоятельного руководства, наличие и характер деловых контактов, стиль и мотивацию их поведения и др.

Для низших управленческих должностей и исполнителей оценка личностных и деловых качеств работников может производиться в упрощенном виде на основе, например, табл. 1 и 2.

Личностные качества работника
Personal qualities of the employee

Таблица 1
Table 1

№ п/п	Личностные качества	Самооценка			Оценка руководителя			Итоговая оценка		
		высокая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Ум									
2	Образованность									
3	Порядочность									
4	Владение речью									

Окончание табл. 1
Table 1 (end)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	Скромность									
6	Простота									
7	Выдержанность									
8	Уравновешенность									
9	Честность									
10	Доброжелательность									
11	Решительность									
12	Сдержанность									
13	Интеллигентность									

Таблица 2
Деловые качества работника
Table 2
Business qualities of the employee

№ п/п	Деловые качества	Самооценка			Оценка руководителя			Итоговая оценка		
		высокая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая
1	Компетентность									
2	Ответственность за порученное дело									
3	Обучаемость									
4	Контактность, коммуникабельность									
5	Дисциплинированность									
6	Добросовестность									
7	Принципиальность									
8	Инициативность									
9	Творческий подход к поставленным задачам									
10	Умение одновременно качественно решать несколько производственных задач									
11	Исполнительность									
12	Трудолюбие									
13	Целеустремленность									
14	Организованность									
15	Требовательность к себе и к подчиненным									
16	Энергичность									
17	Рациональное использование собственного рабочего времени									
18	Умение конструктивно взаимодействовать с вышестоя- щими руководителями									
19	Новаторство									
20	Работа в критических ситуациях									
21	Стрессоустойчивость									

Как видно из табл. 1 и 2, как личностные, так и деловые качества оценивает не только непосредственный руководитель, но и сам работник. Итоговая оценка выводится по результатам аттестации.

Следует отметить, что, несмотря на то, что руководители являются частью персонала, в связи со спецификой их управленческой деятельности упрощенные и стандартные методы оценки работников к ним не вполне подходят.

Как известно, в отечественной и мировой практике разработано значительное число систем оценки управленческого персонала, которые можно классифицировать разнообразным образом. Решение вопроса о содержании оценки является одним из исходных при формировании любой системы управления персоналом. Анализ того, что является содержанием оценки, какие стороны управленческой деятельности подвергаются измерению, анализу и интерпретации, позволяет выделить несколько основных подходов.

В качестве предмета оценки руководителя в различных методиках выступают:

- деловые и личностные качества руководителей;
- характеристики их поведения в различных ситуациях;
- качество выполнения управленческих функций;
- характеристики применяемых средств руководства;
- показатели результатов деятельности возглавляемых ими коллективов;
- результаты организаторской деятельности;
- успешность установления и достижения руководителями целей управления конкретными коллективами.

Краткая характеристика перечисленных методов оценки руководителей достаточно подробно изложена в монографии автора [16].

Однако упомянутые методики на сегодняшний день по тем или иным причинам уже недостаточно эффективны. Возникает необходимость в создании новой, более соответствующей изменившимся условиям внешней среды методике.

Такая методика должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечению высокой объективности формируемой оценки;
- универсальности, когда методика может быть применима как к руководителям, так и к исполнителям разного уровня на предприятиях и в корпорациях различных сфер деятельности;
- методика должна позволять осуществлять оценку не только действующего персонала, но и кандидатов на вакантные должности.

Именно представленная методика оценки квалификации и личных качеств персонала промышленного предприятия и его структурных подразделений и является адекватной методикой для подобной оценки. Методика состоит из следующих частей.

1. Формулирование целей и задач.

Таких целей не должно быть много, при этом в них необходимо отразить наиболее важные задачи деятельности предприятия на перспективный период и быть конкретными, т. е. предметными и специфическими; измеримыми, а именно поддающимися количественной оценке; достижимыми, но напряженными; значимыми, т. е. относящимися к профессиональной деятельности и связанными с задачами предприятия в целом; ориентированными во времени, т. е. для каждой цели должен быть определен срок ее исполнения; согласованными с исполнителем.

К примеру, целями руководителя могут быть:

- снижение себестоимости продукции;
- снижение численности обслуживающего персонала за счёт внедрения новых технологий;
- рост заработной платы;
- увеличение производительности труда.

В составе выбранных целей необходимо выделить как основные, так и второстепенные. Далее осуществляем подсчет удельного веса каждой цели.

Удельные веса должны удовлетворять следующим условиям:

$$p_j \in (0; 1]; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1, \quad (2)$$

где p_j – вес j -й цели; n – количество целей.

2. Оценка достижения поставленных перед исполнителями целей.

Каждая цель, поставленная перед исполнителем, как было отмечено ранее, должна быть измеримой, т. е. иметь ряд показателей, количественно её характеризующих. На основании разницы плановых и фактических значений таких показателей по истечении установленного срока определяется оценка достижения цели по формуле

$$v_{ij} = \frac{\sum_{a=1}^{m_j} 1 - \frac{|R_a^{\text{план}} - R_{ia}^{\text{факт}}|}{R_a^{\text{план}}}}{m_j}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где v_{ij} – оценка достижения цели j исполнителем i ; k – количество исполнителей; m_j – количество показателей, используемых при оценке достижения цели j ; $R_a^{\text{план}}$ – плановое значение показателя m ; $R_{ia}^{\text{факт}}$ – фактическое значение показателя m , полученного исполнителем i .

Отметим, что $v_{ij} \in [0, 1], i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}$.

Далее методом взвешенной суммы определяется соответствие результата деятельности исполнителя поставленным целям:

$$V_i = \sum_{j=1}^n p_j v_{ij}, i = \overline{1, k}, \quad (4)$$

где V_i – оценка достижения совокупности целей i -м исполнителем.

3. Формирование групп исполнителей, способных реализовать поставленные перед ними цели и задачи.

Из всего персонала, прошедшего оценку, отбираются группы исполнителей, у которых все цели выполняются более чем на 80 %. Таким образом, в соответствии с известным принципом эффективности Парето заведомо неоптимальные исполнители не включаются в рекомендуемые методикой группы:

$$v_{ij}^* = \begin{cases} v_{ij}, \min_{j=1, n} \{v_{ij}\} > 0,8 \\ 0, \min_{j=1, n} \{v_{ij}\} \leq 0,8 \end{cases}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где v_{ij}^* – оценки достижения целей, выбранные для исполнителей, по которым все цели выполняются более чем на 80 %.

Для выбранных кандидатов производится перерасчет общей оценки достижения совокупности целей:

$$V_i^* = \sum_{j=1}^n p_j v_{ij}^*, i = \overline{1, k}. \quad (6)$$

Представленная методика является достаточно универсальной и с успехом может быть использована для оценки персонала самых различных предприятий и организаций.

Выводы

Представленная в статье методика оценки квалификации и личных качеств работников и руководящего состава промышленного предприятия является достаточно универсальной, вполне может способствовать повышению качества руководства производственных компаний и благодаря этому улучшить уровень управления промышленными предприятиями.

Список литературы

1. Армстронг М. Практика управления человеческими ресурсами: пер. с англ. СПб.: Питер. 2009. 328 с.
2. Бабосов Е.М., Вайнилович Э.Г., Линкевич О.В. Управление персоналом промышленного предприятия. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 204 с.

3. Грачев М.В. Суперкадры: Управление персоналом в международной корпорации. М.: Дело ЛТД, 2006. 208 с.
4. Грехем Х.Т., Беннетт Р. Управление человеческими ресурсами: пер. с англ. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 180 с.
5. Гречко Н.М. Современные особенности управления трудовыми ресурсами предприятий промышленности. Н. Новгород: Изд-во Волго-Вят. акад. гос. службы, 2004. 25 с.
6. Десслер Г. Управление персоналом: пер. с англ. М.: БИНОМ, 2013. 799 с.
7. Донская Н.А. Управление персоналом промышленного предприятия: моногр. М.: Юпитер, 2005. 204 с.
8. Зайцев Г.Г., Файбушевич С.И. Управление кадрами на предприятии: персональный менеджмент. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та экономики и финансов, 2009. 354 с.
9. Ильина Л.Н. Управление кадровой политикой промышленного предприятия. М.: Юпитер, 2005. 151 с.
10. Коренная К.А., Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр. / под ред. А.Л. Шестакова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 403 с.
11. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленным предприятием: науч. изд. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 574 с.
12. Мордовин С.К. Управление человеческими ресурсами. М.: ИНФРА-М, 2007. 271 с.
13. Срогов Г.А. Управление человеческими ресурсами. М.: Дрофа, 2007. 231 с.
14. Травин В.В., Магура М.И., Курбатова М.Б. Управление человеческими ресурсами. М.: Дело, 2004. 350 с.
15. Управление персоналом / под ред. Т.Ю. Базарова, Б.Л. Еремина. М.: ЮНИТИ, 2002. 560 с.
16. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. М.: ИНФРА-М, 2018. 410 с.

References

1. Armstrong M. *Human resource management practice*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2009. 328p. (In Russ.)
2. Babosov E.M., Vaynilovich E.G., Linkevich O.V. *Upravlenie personalom promyshlennogo predpriyatiya* [Personnel management of an industrial enterprise]. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2023. 204 p. (In Russ.)
3. Grachev M.V. *Superkadry: Upravlenie personalom v mezhdunarodnoy korporatsii* [Super personnel: Human resource management in an international corporation]. Moscow: Delo LTD; 2006. 208 p. (In Russ.)
4. Graham H.T., Bennett R. *Human resource management*. Transl. from Engl. Moscow: UNITY-DANA; 2006. 180 p. (In Russ.)
5. Grechko N.M. *Sovremennyye osobennosti upravleniya trudovymi resursami predpriyatiy promyshlennosti* [Modern features of labor resource management in industrial enterprises]. N. Novgorod: Publishing house of the Volga-Vyatka Academy of Public Administration; 2004. 25 p. (In Russ.)
6. Dessler G. *Human resource management*. Transl. from Engl. Moscow: BINOM; 2013. 799 p. (In Russ.)
7. Donskaya N.A. *Upravlenie personalom promyshlennogo predpriyatiya: monografiya* [Personnel management of an industrial enterprise: monograph]. Moscow: Yupiter; 2005. 204 p. (In Russ.)
8. Zaytsev G.G., Faybushevich S.I. *Upravlenie kadrami na predpriyatii: personal'nyy menedzhment* [Personnel management in an enterprise: personal management]. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University of Economics and Finance; 2009. 354 p. (In Russ.)
9. Il'ina L.N. *Upravlenie kadrovoy politikoy promyshlennogo predpriyatiya* [Management of personnel policy of an industrial enterprise]. Moscow: Yupiter; 2005. 151 p. (In Russ.)
10. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monografiya* [Management of industrial enterprises in conditions of global instability: monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 403 p. (In Russ.)

11. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennym predpriyatiem: nauch. izd.* [Management of an industrial enterprise: scientific publication]. Moscow: Mashinostroenie; 2006. Vol. 1. 574 p. (In Russ.)
12. Mordovin S.K. *Upravlenie chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. Moscow: INFRA-M; 2007. 271 p. (In Russ.)
13. Srogov G.A. *Upravlenie chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. Moscow: Drofa; 2007. 231 p. (In Russ.)
14. Travin V.V., Magura M.I., Kurbatova M.B. *Upravlenie chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. Moscow: Delo; 2004. 350 p. (In Russ.)
15. Bazarov T.Yu., Eremin B.L. (Eds.) *Upravlenie personalom* [Personnel management]. Moscow: UNITY; 2002. 560 p. (In Russ.)
16. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph]. Moscow: INFRA-M; 2018. 410 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Information about the author

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 29.09.2023

The article was submitted 29.09.2023

ПАМЯТИ ГЕННАДИЯ ГРИГОРЬЕВИЧА КУЛИКОВА

IN MEMORY OF GENNADY GRIGORIEVICH KULIKOV



23 марта 2024 года в Уфе на 76-м году ушел из жизни Геннадий Григорьевич Куликов – известный учёный, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный машиностроитель Республики Башкортостан.

Геннадий Григорьевич был большим другом Южно-Уральского государственного университета. Он на протяжении многих лет плодотворно работал в качестве члена редакционной коллегии журнала «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», принимал активное участие в работе диссертационного совета 24.2.437.02, оппонировав многие представленные в совет диссертации, выступал в роли председателя государственных экзаменационных комиссий по кафедре информационно-аналитического

обеспечения управления в социальных и экономических системах Высшей школы электроники и компьютерных наук Южно-Уральского государственного университета.

Редакция журнала выражает искренние соболезнования родным и близким. Светлая память о Геннадии Григорьевиче навсегда останется в сердцах тех, кто знал его, работал и общался с ним.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 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» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2024. Том 24, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 27.04.2024. Дата выхода в свет 06.05.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,48. Тираж 500 экз. Заказ 76/138. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.