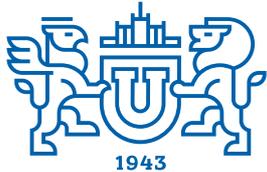


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2024
Т.24, № 3

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:

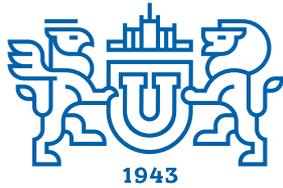
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного 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);
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);
Ганана 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. 3

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;

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;

Shiryaev 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

- ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ТОПОЛЬСКИЙ Д.В., ТОПОЛЬСКИЙ Н.Д., БЕЛЯКОВ А.Е., БЕЛЯКОВА В.А. Разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов 5
- ШИТОЕВ И.Д., МУРАВЬЕВ С.В., ИВАНОВА М.Д., КЛОЯН Г.З. Применение компьютерного зрения для определения реперных точек при оценке геометрии лица 16

Управление в технических системах

- ЛЮТОВ А.Г., ИШКУЛОВА А.Р. Применение эволюционных и роевых методов для оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванического покрытия 29
- НЕКРАСОВ С.Г., ПЕРМИНОВ С.В., ГУСЕВ Е.В., КОДКИН В.Л., ТЕЛЕГИН А.И. Моделирование ударного воздействия ультразвукового бура в составе роботизированной платформы для исследования грунта на небесных телах 40
- ЕФАНОВ В.Н., ИВАНОВА Н.С., РАЗУМОВ В.Г. Интеллектуальная технология оценки остаточного ресурса сложных технических систем 54

Управление в социально-экономических системах

- БАРКАЛОВ С.А., ЧЕРНОВ И.В., ФЕЙЗОВ В.Р. Сценарное моделирование протестного потенциала на основе событийной идентификации динамики факторов 67
- ГИЛЁВ Д.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Модификация модели прогнозирования финансово-экономического состояния для задачи управления развитием медицинских учреждений 82
- СЕРЕБРЯКОВА Е.А., БАРКАЛОВ С.А., МОИСЕЕВ С.И. Оценка альтернатив: новые подходы принятия решений в условиях определенности 90
- КУТЫШКИН А.В. Исследования динамики медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений региона с использованием индекса Малмквиста 99

Краткие сообщения

- GELRUD Ya.D., SHESTAKOVA L.I., GUSEV E.V., KODKIN V.L., SHIRIAEV V.I. Modeling political processes in a multicriterial setting 111

CONTENTS

Informatics and computer engineering

- LOGINOVSKIY O.V., TOPOLSKII D.V., TOPOLSKII N.D., BELIAKOV A.E., BELIAKOVA V.A. Development of a digital twin of the control system test bench for digital instrument transformers 5
- SHITOEV I.D., MURAVEV S.V., IVANOVA M.D., KLOYAN G.Z. The use of computer vision to determine reference points when evaluating the geometry of a face 16

Control in technical systems

- LYUTOV A.G., ISHKULOVA A.R. Application of evolutionary and swarm methods to optimize the multiparametric control of the electroplating process 29
- NEKRASOV S.G., PERMINOV S.V., GUSEV E.V., KODKIN V.L., TELEGIN A.I. Simulation of the impact of an ultrasonic drill as a composition of a robotic platform for investigation of soil on celestial bodies 40
- EFANOV V.N., IVANOVA N.S., RAZUMOV V.G. Intelligent technology for assessing the remaining useful life of complex technical systems 54

Control in social and economic systems

- BARKALOV S.A., CHERNOV I.V., FEYZOV V.R. Scenario analysis of protest potential based on event identification of the dynamics of factors 67
- GILEV D.V., LOGINOVSKIY O.V. Modification of the financial and economic forecasting model for the task of managing the development of medical institutions 82
- SEREBRYAKOVA E.A., BARKALOV S.A., MOISEEV S.I. Evaluating alternatives: new approaches for decision making under certainty 90
- KUTYSHKIN A.V. Research on the dynamics of medical efficiency of the functioning of medical institutions in the region using the Malmquist index 99

Brief reports

- GELRUD Ya.D., SHESTAKOVA L.I., GUSEV E.V., KODKIN V.L., SHIRIAEV V.I. Modeling political processes in a multicriterial setting 111

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.942

DOI: 10.14529/ctcr240301

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

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

Д.В. Топольский, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

А.Е. Беляков, alex.beliakov@susu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

В.А. Белякова, pochinskaiava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В представленной работе рассматривается вариант реализации цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов средствами универсальной SCADA-системы. Основой конструкции испытательного стенда является следящий гидропривод с гидростатическими направляющими. Цифровые измерительные трансформаторы должны иметь срок службы не менее 25 лет, межповоротный интервал – 8 лет и более. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. В частности, для проверки надежности работы этого класса устройств необходимо проведение испытаний на диагностическом вибростенде. Задача создания испытательных стендов на основе следящего гидропривода с гидростатическими направляющими является актуальной научно-технической задачей. Разработана архитектура цифрового двойника системы управления испытательного стенда. Для тестирования функционала приложения выполнено имитационное моделирование работы цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов. **Цель исследования:** на основе анализа режимов работы испытательного стенда и вариантов реализации цифровых двойников разработать прототип системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов средствами универсальной SCADA-системы. **Материалы и методы.** Поставленные научные задачи решены с применением ключевых методов цифровизации производства, компьютерного и имитационного моделирования взаимодействия цифрового двойника с элементами системы управления испытательного стенда. **Результаты.** Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов. Предлагается при программной реализации цифрового двойника использовать отечественную универсальную SCADA-систему. **Заключение.** Анализ вариантов реализации цифрового двойника показал, что применение универсальных SCADA-систем упрощает процесс разработки. Подобные программные комплексы обеспечивают возможность управления автоматизированными технологическими процессами, проведения сбора и обработки данных в реальном времени, отслеживания состояния оборудования и хода производственных процессов, а также быстрого реагирования на любые неполадки. При разработке цифрового двойника использование универсальной SCADA-системы обосновано. Прототипирование системы управления испытательного стенда выполнено средствами универсальной отечественной SCADA-системы. Разработан OPC-сервер для обмена данными с микроконтроллером семейства STM32 в приложении Modbus Universal MasterOPC и проект в системе MasterSCADA. Тестирование приложения показало полную работоспособность разработанного проекта.

Ключевые слова: цифровой измерительный трансформатор, цифровой двойник, испытательный стенд, SCADA-система, имитационное моделирование

Благодарности. Работа выполнена за счет средств областного бюджета в виде субсидии на реализацию научно-технических проектов Челябинской области, включенных в перечень проектов Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня «Передовые про-

изводственные технологии и материалы» в 2022 году (соглашение № 604 от 22.12.2022) проект «Разработка отечественного программного комплекса для управления, настройки и диагностики следящего гидропривода с гидростатическими направляющими», в рамках проекта «Разработка и создание производства следящих гидроприводов с гидростатическими направляющими (СГ с ГСН)».

Для цитирования: Разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr240301

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240301

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF THE CONTROL SYSTEM TEST BENCH FOR DIGITAL INSTRUMENT TRANSFORMERS

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

D.V. Topolskii, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

N.D. Topolskii, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

A.E. Beliakov, alex.beliakov@susu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

V.A. Beliakova, pochinskaiava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The presented work considers the option of implementing a digital twin of a test bench control system for digital instrument transformers using a universal SCADA system. The basis of the design of the test bench is a hydraulic servo drive using hydrostatic guides. Digital instrument transformers must have a service life of at least 25 years, a verification interval of 8 years or more. To achieve such high performance characteristics, a large number of tests are required for such products. In particular, to check the reliability of operation of this class of devices, it is necessary to conduct tests on a diagnostic vibration stand. The task of creating test benches based on a hydraulic servo drive using hydrostatic guides is an urgent scientific and technical task. The architecture of a digital twin of the test bench control system has been developed. To test the functionality of the application, a simulation of the operation of a digital twin of the control system of a test bench for digital instrument transformers was performed. **Aim.** Based on an analysis of the operating modes of the test bench and options for implementing digital twins, develop a prototype of a test bench control system for digital instrument transformers using a universal SCADA system. **Materials and methods.** The posed scientific problems were solved using key methods of digitalization of production, computer and simulation modeling of the interaction of the digital twin with elements of the test bench control system. **Results.** The main practical result of the research is the development of a digital twin of the test bench control system for digital instrument transformers. It is proposed to use the domestic universal SCADA system when implementing the digital twin in software. **Conclusion.** Analysis of options for implementing a digital twin showed that the use of universal SCADA systems simplifies the development process. Such software systems provide the ability to control automated technological processes, collect and process data in real time, monitor the condition of equipment and the progress of production processes, as well as quickly respond to any problems. When developing a digital twin, the use of a universal SCADA system is justified. Prototyping of the test bench control system was carried out using a universal domestic SCADA system. An OPC server has been developed for data exchange with a microcontroller of the STM32 family in the Modbus Universal MasterOPC application and a project in the MasterSCADA system. Testing of the application showed the full functionality of the developed project.

Keywords: digital instrument transformer, digital twin, test bench, SCADA system, simulation

Acknowledgments. The study was executed due to the Chelyabinsk region budget by subsidizing of scientific-technical projects from roster study projects of the world-class Interregional Ural Scientific and Educational Institution “Forward Industrial Technologies and Materials” in 2022 (contract number 604, 12/22).

For citation: Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E., Beliakova V.A. Development of a digital twin of the control system test bench for digital instrument transformers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240301

Введение

Цифровая трансформация сегодня затрагивает подавляющее большинство отраслей производственной и непроизводственной деятельности человека. В том числе активное развитие получают интеллектуальные энергосистемы, являющиеся неотъемлемым элементом умного производства и одной из основ качественного уклада жизни огромного числа людей. Поэтому при переходе к новому технологическому уровню в области цифровизации энергосистем задействованы существенные ресурсы и современные достижения в информационных и коммуникационных технологиях, электронике, экономике и управлении [1, 2].

Основой перехода к интеллектуальным энергосистемам является создание новых программно-технологических комплексов, в частности, переход на технологию цифровых электроподстанций. В свою очередь, это подразумевает разработку и организацию массового производства цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Цифровые (электронные) измерительные трансформаторы (ИТ) на цифровых подстанциях приходят на замену традиционным ИТ. Помимо того, что по сравнению с традиционными ИТ электронные ИТ имеют меньшие массу, габариты, стоимость и пожароопасность, они благодаря развитию компьютерных технологий уже могут быть наделены слабым искусственным интеллектом. По сути они являются киберфизическими устройствами, на которые может быть возложена часть функций управления программно-технологическими комплексами в составе интеллектуальных энергосистем [3, 4].

Цифровые ИТ должны иметь срок службы не менее 25 лет, межповерочный интервал – 8 лет и более. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. В частности для проверки надежности работы этого класса устройств необходимо проведение испытаний на диагностическом вибростенде (рис. 1), в состав которого входят гидроцилиндр с гидростатическими направляющими (ГП с ГСН), электрогидравлический усилитель мощности (ЭГУМ), датчик положения (ДП), стендовое испытательное оборудование, персональный компьютер (ПК) и платформа, на которой располагается объект испытаний – цифровой ИТ. Соответственно, ЭГУМ включает в себя электронный блок управления (ЭБУ), высоко-частотную золотниковую пару (ВЗП) и электромеханический преобразователь (ЭМП) [5].

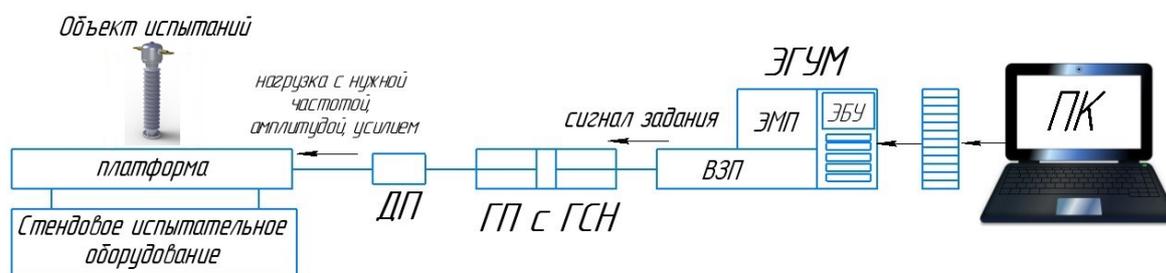


Рис. 1. Объект испытаний на вибростенде
Fig. 1. Test object on a vibration stand

Благодаря применению специальных гидростатических направляющих в конструкции гидропривода используемый в испытательном стенде гидропривод обладает ресурсом работоспособности в эксплуатационных нагрузках до 100 млн циклов. Задача создания ГП с ГСН является актуальной научно-технической задачей. ГП с ГСН является инновационным импортозамещающим продуктом на отечественном рынке. В настоящее время ведется разработка системы управления для конфигурации и мониторинга параметров ГП с ГСН, разработанного Уральским инженеринговым центром (УРИЦ) [6]. В целях повышения эффективности работ и сокращения времени разработки в проекте применена технология использования цифровых двойников.

1. Постановка задач

Поскольку все компоненты стенда в настоящее время реализованы на уровне прототипов, то целесообразно применение технологии цифровых двойников для распараллеливания процесса разработки аппаратуры и программного обеспечения [7, 8]. Поэтому при разработке системы

управления испытательным стендом закономерно её предварительное прототипирование на основе цифрового двойника.

Цифровой двойник применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включающих в себя разработку, изготовление и эксплуатацию. С учетом большого количества определений понятия «цифровой двойник» при решении задач проекта под цифровым двойником будем понимать программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды [9].

Цифровые двойники представляют собой, как правило, сложный программный продукт, который создается на основе самых разнообразных данных и технологий. Уже на этапе эскизного проектирования с использованием программного обеспечения для проведения имитационного моделирования возможно создание вариаций системной модели разрабатываемого изделия с целью оценки и выбора наилучшего технического решения. Далее на этапе технического проектирования полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться. Эти цифровые двойники постоянно обновляются вслед за изменением физических прототипов [10, 11].

Аппаратную основу системы управления диагностическим стендом представляет собой ЭБУ, входящий в состав ЭГУМ. ЭБУ взаимодействует с программным комплексом для управления, настройки и диагностики следящего ГП с ГСН, установленным на ПК, и с ВЗП, обеспечивающей задание управляющего воздействия на испытательный стенд. С программным комплексом ЭБУ взаимодействует посредством протоколов Modbus RTU и Modbus TCP, удовлетворяющих режиму SRT(Soft-Real-Time), с ВЗП ЭБУ взаимодействует посредством ЭМП. Таким образом, физическим прототипом ЭБУ будет являться плата-имитатор на базе микроконтроллера семейства STM32 и со встроенной поддержкой USB (рис. 2).

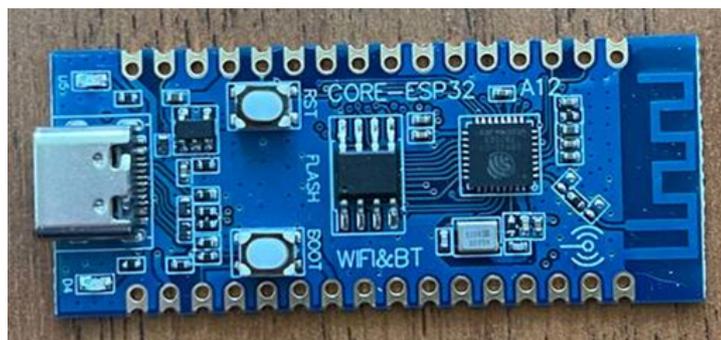


Рис. 2. Плата-имитатор ЭБУ
Fig. 2. Electronic control unit signal simulator

Таким образом, при создании полноценного цифрового двойника необходимо осуществить выбор или разработку программного обеспечения для осуществления имитационного моделирования, которое способно взаимодействовать с платой-имитатором ЭБУ в режиме, близком к реальному времени, в целях обеспечения автоматизированной работы ГП с ГСН и выполнения функций управления, наладки и диагностики исполнительных механизмов испытательного стенда.

2. Обоснование выбора пути решения задач проекта по созданию цифрового двойника системы управления испытательного стенда

В настоящее время стандартным компонентом автоматизированных систем управления технологическим процессом являются SCADA-системы. Подобные программные комплексы обеспечивают возможность управления автоматизированными технологическими процессами, проведения сбора и обработки данных в реальном времени, отслеживания состояния оборудования и хода производственных процессов, а также настройки сигнализаций и быстрого реагирования на любые неполадки. SCADA-системы также позволяют осуществлять контроль удаленных объектов на расстоянии, а управленческие права диспетчера могут автоматически изменяться в зависимости от текущего состояния технологических процессов [12, 13].

Структура SCADA-системы включает в себя три основных компонента (рис. 3):

Remote Terminal Unit (RTU) – удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи в режиме реального времени. Конкретика его реализации определяется спецификой применения.

Master Terminal Unit (MTU) – диспетчерский пункт управления (главный терминал) осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого (квази-) реального времени. В зависимости от особенностей системы управления MTU может быть реализован в самом разнообразном виде от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи до больших вычислительных систем.

Communication System (CS) – коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на диспетчерский пункт управления и передачи сигналов управления на RTU.



Рис. 3. Компоненты SCADA-системы
Fig. 3. SCADA components

Структура, приведенная на рис. 3, во многом совпадает со структурой разрабатываемого цифрового двойника. Поэтому представляется возможным использование универсальной SCADA-системы в качестве прототипа управляющего программного комплекса. В силу условий проекта в рассмотрении участвовали только отечественные надежные SCADA-системы. Сравнение вариантов использования универсальных SCADA-систем применительно к задаче прототипирования системы управления испытательного стенда приведено в таблице [14, 15].

Таблица

Анализ вариантов реализации прототипа

Table

Analysis of prototype implementation options

Критерий анализа	Trace Mode	КРУГ-2000	САРГОН	MasterSCADA
Совместимость с операционными системами	Windows (7, 8, 10), Linux и macOS	Windows (XP, 7, 8, 10), Linux (Ubuntu, CentOS)	Windows (CE, 7, 8, 10), Linux (Ubuntu, CentOS, Red Hat, Debian)	Windows (10 и все более поздние), Linux (любые дистрибутивы), macOS
Поддержка промышленных протоколов	Modbus, OPC, DNP3, BACnet, SNMP, MQTT, Profibus, Ethernet/IP, M-Bus	Modbus, DNP3, OPC, BACnet, SNMP, MQTT, CANopen	Modbus, OPC, SNMP, BACnet	Modbus, OPC, SNMP, BACnet, DNP3
Поддерживаемые базы данных	Microsoft SQL Server, MySQL, PostgreSQL, Oracle Database, SQLite	Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL, SQLite	Microsoft SQL Server, MySQL/MariaDB, PostgreSQL, Oracle Database	Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL, Oracle Database
Встроенные языки программирования	C/C++, Visual Basic Scripting, JavaScript	C/C++	Java, C#, SQL, JavaScript, Python	Ladder Logic, Structured Text, C/C++, Visual Basic, JavaScript, Java
Интеграция в системы управления	Протоколы связи, драйвера, веб-интеграция, интеграция с базами данных	Протоколы коммуникации, интеграция с базами данных, веб-сервисы, интеграция с SCADA-системами, API и SDK	Веб-сервисы, сетевые подключения	Протоколы коммуникации, веб-сервисы, пользовательские драйверы

Критерий анализа	Trace Mode	КРУГ-2000	САРГОН	MasterSCADA
Обслуживание	Обновление ПО; обучение и консультации; диагностика системы; восстановление данных	Диагностика и мониторинг, журнал событий, резервное копирование и восстановление	Обновление ПО; обучение и консультации; диагностика системы; восстановление данных	Большое сообщество пользователей, документации и обучение, обновление ПО, управление пользователями и их правами
Простота разработки и развития	Позволяет создавать системы управления и контроля процессов без необходимости глубоких знаний программирования, что делает ее доступной для широкого круга пользователей	Для сложных и крупных проектов, требующих значительного изменения архитектуры системы, интеграции с большим количеством устройств и систем, разработка и развитие системы КРУГ-2000 может быть сложной и требующей профессиональных знаний и опыта	Требует огромных денежных ресурсов и специалистов высокой квалификации	Позволяет создавать системы управления и контроля процессов без необходимости глубоких знаний программирования, что делает ее доступной для широкого круга пользователей

При разработке цифрового двойника использование универсальной отечественной SCADA-системы обосновано. Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания цифрового двойника на основе MasterSCADA. В соответствии с выбором данного варианта реализации цифрового двойника стенда вытекают нижеприведенные программные решения при проведении имитационного моделирования.

3. Имитационное моделирование работы системы управления испытательного стенда

Проверка адекватности взаимодействия системы с компонентами испытательного стенда проведена путем проведения имитационного моделирования. Целью имитационного моделирования являлось изучение состояния регистров ЭБУ в процессе выполнения технологических операций.

При реализации цифрового двойника потребовалось создание проекта MasterSCADA и OPC-сервера. MasterSCADA опрашивает и записывает данные в OPC-сервер, который предоставляет данные в формате «тегов». Сами теги представляют собой объектно-ориентированные сущности – регистры ЭБУ. С помощью такого интерфейса удобно управлять всем стендом с помощью SCADA-системы. Цифровая передача данных между ЭБУ и программным комплексом в режиме SRT осуществляется с частотой от единиц до десятков герц. Режим SRT не позволяет в реальном времени считывать данные осциллограмм с отсчетами в микросекунды. По этой причине в проекте SCADA-системы заложены алгоритмы пакетной передачи данных, которые в автоматическом режиме позволяют взаимодействовать с регистрами ЭБУ. Разработанное приложение позволяет записывать регистры и представлять результаты вычислений в соответствии с запросом заказчика. На рис. 4 представлена структурная схема OPC-сервера.

Приложение MasterOPC Modbus Universal Server позволяет использовать такие объекты, как узел, устройство, группу (используется для удобства, например, если теги возможно объединить по общему признаку) и тег (HOLDING REGISTER). Для каждого из элементов необходимо задать параметры для подключения и в дальнейшем корректного обмена между эмулятором ЭБУ и сервером SCADA. Структурная схема проекта SCADA-системы представлена на рис. 5.

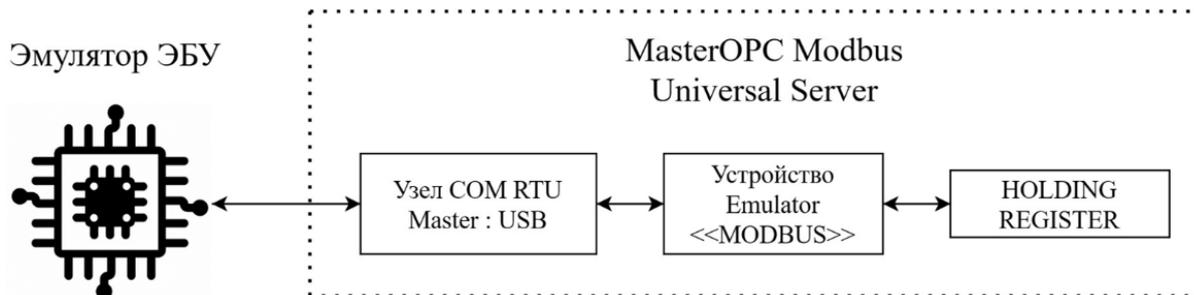


Рис. 4. Структурная схема OPC-сервера
Fig. 4. Block diagram of an OPC server

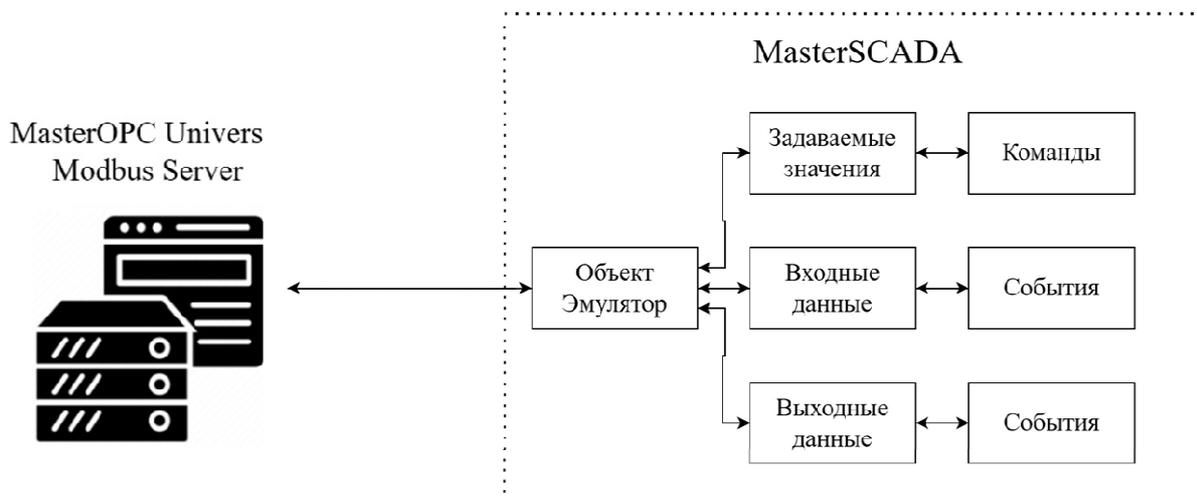


Рис. 5. Структурная схема проекта SCADA-системы
Fig. 5. Block diagram of the SCADA system project

Логика обмена данными между проектом в MasterSCADA и OPC-сервера в Modbus Universal MasterOPC представлена на рис. 6.

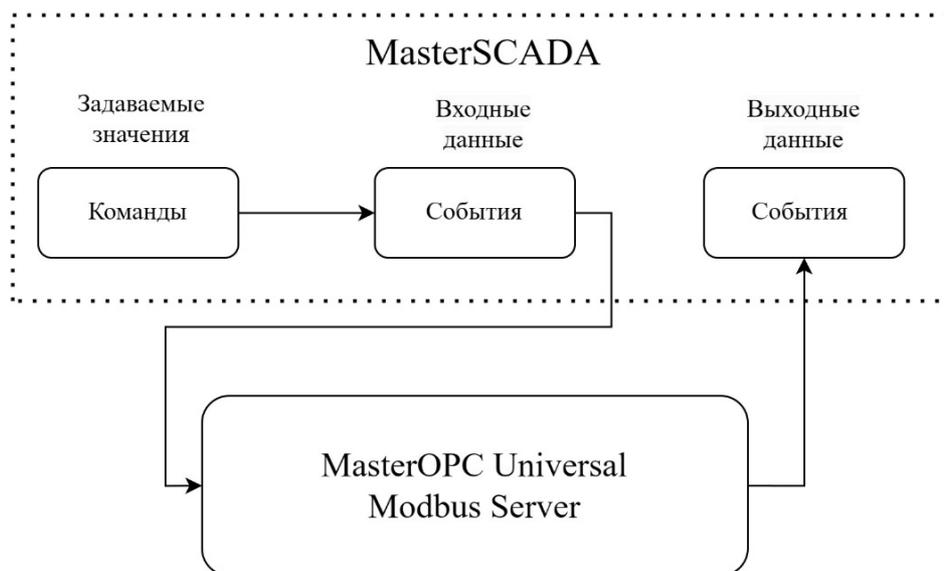


Рис. 6. Модель передачи данных между проектом MasterSCADA и OPC-сервером
Fig. 6. Data transfer model of the MasterSCADA project -OPC server

Конфигурация проекта в MasterSCADA представлена на рис. 7.

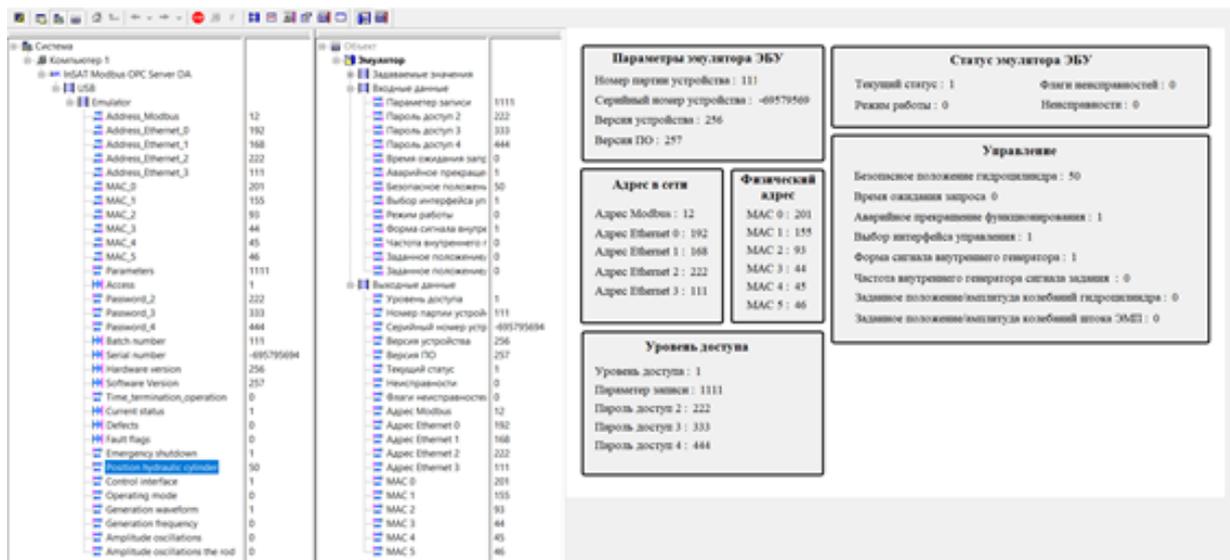


Рис. 7. Конфигурация проекта SCADA-системы
Fig. 7. SCADA project configuration

Реализация алгоритма ввода-вывода данных имитатора средствами MasterSCADA представлена на рис. 8.

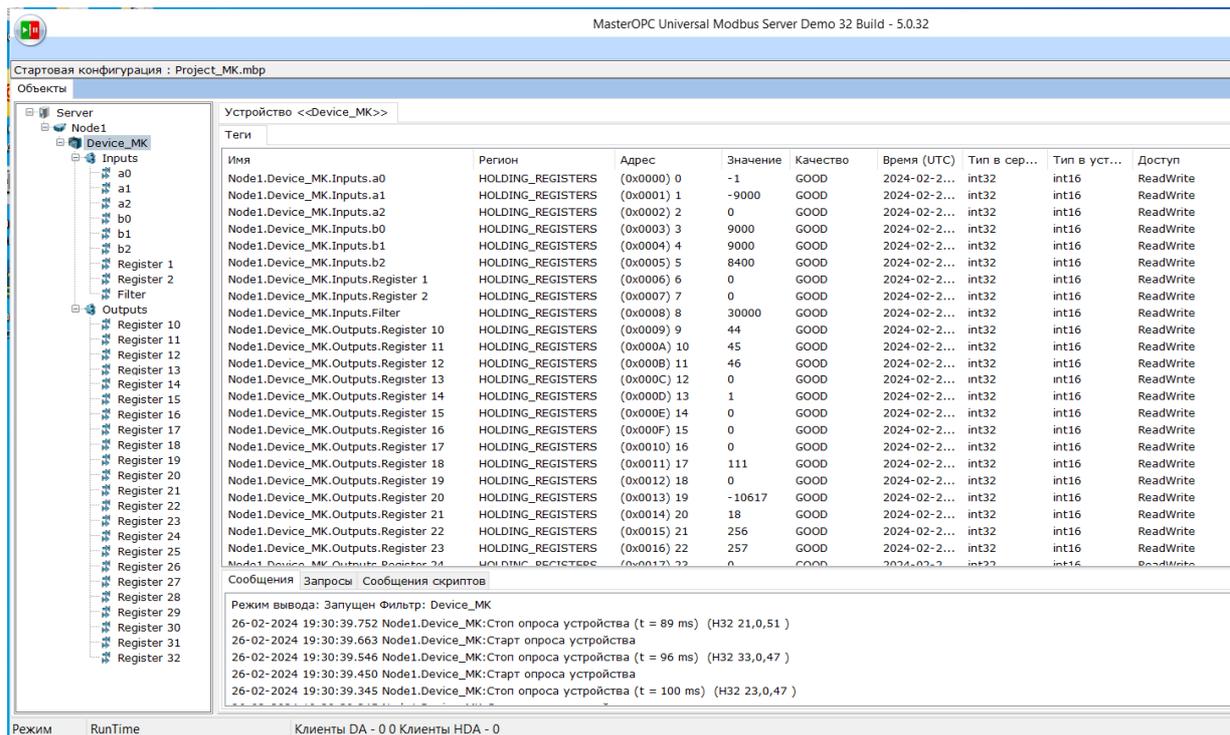


Рис. 8. Алгоритм ввода-вывода данных имитатора
Fig. 8. Simulator data input-output algorithm

Временные конфигурационные параметры: скорость передачи данных по COM-порту 9600 бод; контроль четности четный, стоп-бит; период опроса 20 мс; повторы при ошибке подключения 3; повторы при ошибке записи 3; сброс команд при разрыве соединения; повторное соединение после ошибки через 10 с; период опроса после ошибки 10 мс; задержка опроса после получения ответа 20 мс. Считанные данные из регистров с 10-го по 32-й представлены на рис. 9.

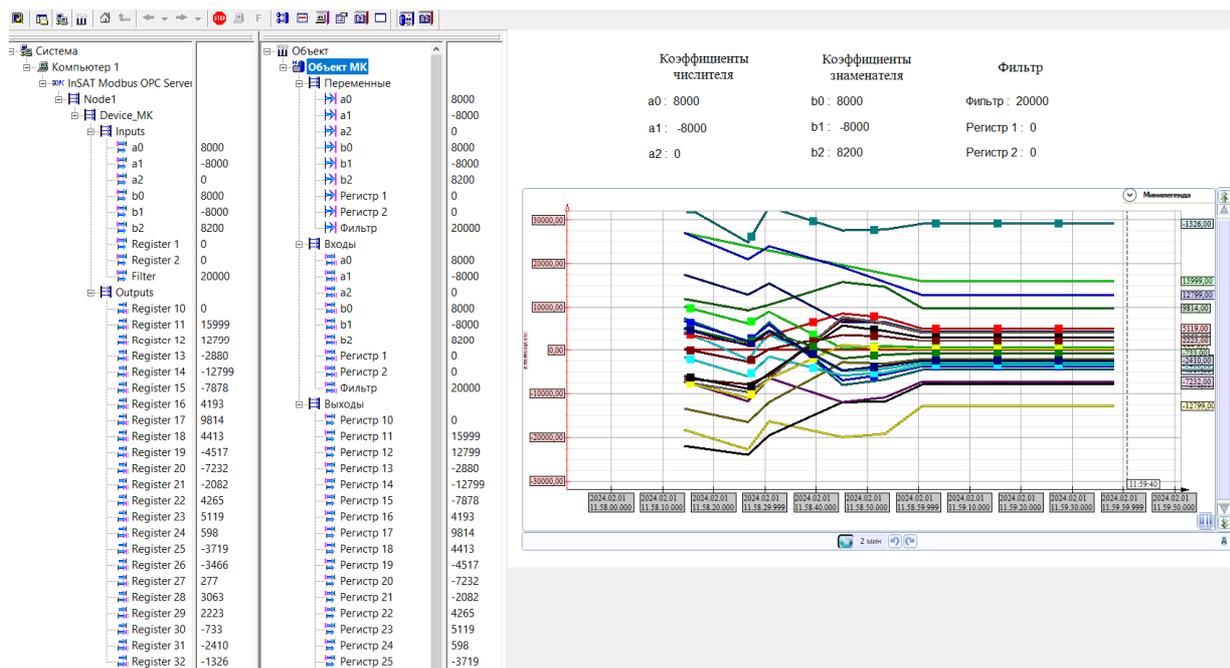


Рис. 9. Чтение данных из регистров 10–32
Fig. 9. Read data from registers 10–32

Время работы программы, включающей 32 регистра, из которых 13 регистров задают параметры для настройки состояния следящего гидропривода, следующие 19 регистров считывают данные состояния и подключения ЭБУ, составило 0,48 с. Это в полной мере отвечает требованиям к разработке программного комплекса для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими.

Выводы

На основе анализа взаимодействия аппаратной и программной части диагностического стенда разработана архитектура цифрового двойника системы управления вибростенда для испытания цифровых трансформаторов. Разработанная архитектура цифрового двойника системы управления ориентирована на обеспечение автоматизированной работы испытательного стенда в различных технологических режимах в условиях воздействий помех и окружающей среды. Применение технологии цифровых двойников для распараллеливания процесса разработки аппаратуры и программного обеспечения значительно повышает эффективность работы.

Анализ вариантов реализации цифрового двойника показал, что применение универсальных SCADA-систем упрощает процесс разработки. При разработке цифрового двойника использование универсальной SCADA-системы обосновано. Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания цифрового двойника системы управления вибростенда на основе MasterSCADA.

Проверка адекватности взаимодействия цифрового двойника системы управления испытательного стенда с компонентами испытательного стенда проведена путем проведения имитационного моделирования. Целью имитационного моделирования являлось изучение состояния регистров ЭБУ в процессе выполнения технологических операций. Прототипирование системы управления испытательного стенда выполнено средствами универсальной отечественной SCADA-системы MasterSCADA. Разработан OPC-сервер для обмена данными с микроконтроллером семейства STM32 в приложении Modbus Universal MasterOPC и проект в системе MasterSCADA. Тестирование программы показало полную работоспособность разработанного проекта.

Список литературы

1. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев и др. // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. DOI: 10.25728/ru.2019.1.1
2. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9–27. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
3. Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. 2023. № 1 (45). С. 42–49.
4. Коновалов Ю.В., Леб М.С., Потапов И.Н. Замена аналоговых трансформаторов тока и напряжения на цифровые // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 35–38.
5. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 19–31. DOI: 10.14529/ctcr240102
6. Результаты развития проектов Уральского НОЦ обсудили на конференции // ЮУрГУ: сайт. URL: <https://www.susu.ru/ru/news/2024/02/19/rezultaty-razvitiya-proektov-uralskogo-noc-obsudili-na-konferencii> (дата обращения: 17.06.2024).
7. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 124–133. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
8. Сысоева Е.А. Национальный стандарт Российской Федерации в области цифровых двойников // Компетентность. 2022. № 3. С. 10–13. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-3-10-13
9. Петров А.В. К вопросу автоматизации построения имитационных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 9. С. 101–110. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110
10. Орысюк Д.А., Коновалова В.С. Аспекты применения цифровых двойников изделий // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 385–386.
11. Петракова К.В., Зазулина А.Б., Лутков А.Н. Стенд для тестирования специализированных цифровых вычислительных устройств // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2012. № 4. С. 75–80.
12. Миронов Д.А., Ламм А.К., Расулов Р.К. Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников // Вестник Национального института бизнеса. 2022. № 4 (48). С. 12–27.
13. Деменков Н.П. SCADA-системы как инструмент проектирования АСУ ТП. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 328 с.
14. Руководство пользователя Trace Mode 5.0. М.: Фирма Adastra, 2003. 909 с.
15. Тугов В.В., Сергеев А.И., Шаров Н.С. Проектирование автоматизированных систем управления в TRACE MODE: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2017. 307 с.

References

1. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P. et al. [Problems of development of digital energy in Russia]. *Control Sciences*. 2019;(1):2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/ru.2019.1.1
2. Loskutov A.B. [Problems of the transition of the electric power industry to digital technologies]. *Smart Electrical Engineering*. 2018;(1):9–27. (In Russ) DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
3. Lebedev V.D., Kuzmina N.V., Grigoriev D.G. et al. [Theory and practice of using digital measuring current and voltage transformers]. *Relayman*. 2023;1(45):42–49. (In Russ)
4. Konovalov Yu.V., Leb M.S., Potapov I.N. Replacement of analog current and voltage transformers to digital. *Bulletin of Angarsk State Technical University*. 2023;(17):35–38. (In Russ)
5. Loginovskiy O.V., Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):19–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240102
6. [The results of the development of the Ural Scientific and Educational Center projects were discussed at the conference (2024)]. *SUSU: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.susu.ru/ru/news/2024/02/19/rezultaty-razvitiya-proektov-uralskogo-noc-obsudili-na-konferencii> (accessed 17 June 2024).

7. Korovin G.B. The opportunities for using digital twins in industry. *Transbaikal state university journal*. 2021;27(8):124–133. (In Russ.) DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
8. Sysoeva E.A. Sysoeva E.A. The world's first national standard of the Russian Federation in the field of digital twins is adopted. *Competency (Russia)*. 2022;(3):10–13. (In Russ.) DOI: 10.24412/1993-8780-2022-3-10-13
9. Petrov A.V. To the problem of simulation modeling automation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(9):101–110. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110
10. Orysyuk D.A., Konovalova V.S. [Aspects of the application of digital twins of products]. *Molodye uchenye – razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)* [Young scientists – for the development of the National Technological Initiative (POISK)]. 2023;(1):385–386. (In Russ.)
11. Petrakova K.V., Zazulina A.B., Lutkov A.N. [Test stand for specialized digital computing devices]. *Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2012;(4):75–80. (In Russ.)
12. Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Overview of software products for the development of digital twins. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2022;4(48):12–27. (In Russ.)
13. Demenkov N.P. *SCADA-sistemy kak instrument proektirovaniya ASU TP* [SCADA systems as a tool for designing automated process control systems]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2004. 328 p. (In Russ.)
14. *Rukovodstvo pol'zovatelya Trace Mode 5.0* [User Manual Trace Mode 5.0]. Moscow: Adastra; 2003. 909 p. (In Russ.)
15. Tugov V.V., Sergeev A.I., Sharov N.S. *Proektirovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniya v TRACE MODE: uchebnoe posobie* [Design of automated control systems in TRACE MODE. Tutorial]. Orenburg: Orenburg State University Publ.; 2017. 307 p. (In Russ.)

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.

Топольский Дмитрий Валерианович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiidv@susu.ru.

Топольский Никита Дмитриевич, аспирант кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiind@susu.ru.

Беляков Александр Евгеньевич, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alex.beliakov@susu.ru.

Белякова Вероника Алексеевна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pochinskaiava@susu.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.

Dmitrii V. Topolskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiidv@susu.ru.

Nikita D. Topolskii, Postgraduate student of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiind@susu.ru.

Alexander E. Beliakov, Senior Lecturer of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alex.beliakov@susu.ru.

Veronica A. Beliakova, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pochinskaiava@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

The article was submitted 19.06.2024

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ПРИ ОЦЕНКЕ ГЕОМЕТРИИ ЛИЦА

И.Д. Шитоев^{1,2}, ShitoevID@yord.tech, <https://orcid.org/0000-0002-6391-9271>

С.В. Муравьев^{3,4}, sergey89.m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-4710>

М.Д. Иванова¹, ivanova-mashaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1471-8326>

Г.З. Клоян², kloyang@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6615-8159>

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² ООО «Йорд Тех», Пермь, Россия

³ Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера, Пермь, Россия

⁴ Научно-медицинский центр «Родник», Пермь, Россия

Аннотация. Применение компьютерного зрения для определения геометрии лица при помощи реперных точек является относительно новым подходом в медицине. Актуальность данного исследования обусловлена не только необходимостью разработки новых методов и подходов в определении геометрии лица, но и растущим интересом к развитию и применению искусственного интеллекта в медицине. **Цель исследования.** Цель данной статьи – разработать математические и нейросетевые алгоритмы, определяющие геометрию лица при помощи реперных точек. **Материалы и методы.** Для обучения нейронной сети использовалась малая выборка из 1000 размеченных фотографий, находящаяся в открытом доступе, на которых изображен портрет человека по плечи анфас. Рассматривались только взрослые (18+) представители европеоидной расы. Разметка фотографий производилась с помощью инструмента графического анализа изображений LabelImg 1.8.6, в котором в режиме графического интерфейса вручную отмечались области нахождения (классы определения) реперных точек. В качестве архитектуры нейронной сети выбрана YOLO 8. **Результаты.** Было показано, что точность поиска точек обученной на 1000 сгруппированных фотографиях нейронной сетью достигает 98,15 %, что свидетельствует о хорошем определении границ объектов и их классификации. **Заключение.** Проведенное исследование продемонстрировало успешную разработку и применение нейросетевых алгоритмов для определения альтернативных реперных точек, характеризующих геометрию лица. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной авторами методики в косметологии, а также указывают на ее потенциал для применения в других областях медицины, таких как стоматология, неврология и хирургия.

Ключевые слова: нейронная сеть, реперные точки, компьютерное зрение, геометрия лица

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Пермского научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».

Для цитирования: Применение компьютерного зрения для определения реперных точек при оценке геометрии лица / И.Д. Шитоев, С.В. Муравьев, М.Д. Иванова, Г.З. Клоян // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 16–28. DOI: 10.14529/ctcr240302

THE USE OF COMPUTER VISION TO DETERMINE REFERENCE POINTS WHEN EVALUATING THE GEOMETRY OF A FACE

I.D. Shitoev^{1, 2}, ShitoevID@yord.tech, <https://orcid.org/0000-0002-6391-9271>

S.V. Muravev^{3, 4}, sergey89.m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-4710>

M.D. Ivanova¹, ivanova-mashaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1471-8326>

G.Z. Kloyan², kloyang@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6615-8159>

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² LLC “Yord Tech”, Perm, Russia

³ Academician Ye.A. Vagner Perm State Medical University, Perm, Russia

⁴ Scientific and Medical Center “Rodnik”, Perm, Russia

Abstract. The use of computer vision to determine the geometry of a face using reference points is a relatively new approach in medicine. The relevance of this study is due not only to the need to develop new methods and approaches in determining the geometry of the face, but also to the growing interest in the development and application of artificial intelligence in medicine. **The research objective.** The purpose of this article is to develop mathematical and neural network algorithms that determine the geometry of a face using reference points. **Material and methods.** To train the neural network, a small sample of 1,000 marked-up photos in the public domain was used, which depict a full-face portrait of a man up to his shoulders. Only adult (18+) representatives of the Caucasian race were considered. The photos were marked up using the LabelImg 1.8.6 graphical image analysis tool, in which the areas of finding (classes of definition) of reference points were manually marked in the graphical interface mode. YOLO 8 was chosen as the neural network architecture. **Results.** It was shown that the accuracy of the point search by a neural network trained on 1000 grouped photographs reaches 98.15%, which indicates a good definition of the boundaries of objects and their classification. **Conclusion.** The conducted research demonstrated the successful development and application of neural network algorithms to determine alternative reference points characterizing the geometry of the face. The results obtained confirm the effectiveness of the technique proposed by the authors in cosmetology, and also indicate its potential for use in other fields of medicine, such as dentistry, neurology and surgery.

Keywords: neural network, reference points, computer vision, facial geometry

Acknowledgments. The study was carried out with the support of the world-class Perm scientific and educational center “Rational Subsoil Use”.

For citation: Shitoev I.D., Muravev S.V., Ivanova M.D., Kloyan G.Z. The use of computer vision to determine reference points when evaluating the geometry of a face. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):16–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240302

Введение

Важным фактором, способствующим популярности компьютерного зрения, стало значительное увеличение вычислительной мощности графических процессоров. Прежде компьютерам требовалось большое количество времени на обработку и анализ изображений, а сегодня графические процессоры могут эффективно справляться с этой задачей. Благодаря этому использование компьютерного зрения стало доступно в реальном времени. Вместе с этим появились инструменты и библиотеки для обработки данных и обучения моделей также стимулирует рост компьютерного зрения. Эти инструменты значительно упрощают процесс разработки и тестирования алгоритмов компьютерного зрения, делая его доступным для широкого круга специалистов [1–4].

Биометрические технологии все более распространены в системах компьютерного зрения. Это инновационные методы, позволяющие использовать физические и поведенческие характеристики человека для идентификации и аутентификации технологии [4–6]. В настоящее время распознавание биометрических характеристик лица широко распространено в различных сферах деятельности, включая безопасность, здравоохранение, банковское дело, государственное управ-

ление и др. (например, аутентификация в банке, разблокировка смартфона, распознавание преступников по камерам). В последнее время такие технологии все больше применяются в косметологии, так как обладают рядом неоспоримых преимуществ, в частности, являются бесконтактными и неинвазивными. В основе технологии распознавания биометрических характеристик лица лежит использование компьютерного зрения. Применение таких технологий зачастую не требовательно к аппаратным ресурсам, и с каждым годом стоимость таких решений снижается за счет развития технологий съемки.

Актуальность разработанного продукта основана на повышении интереса пациентов к совершенствованию эстетических и гармонических характеристик лица, в том числе эстетики в зоне улыбки [2, 3, 7]. В настоящее время большинство имеющихся решений отличаются развлекательной направленностью. Современные инструменты не оценивают реальную геометрию лица и его возрастные изменения и редко используются на практике, так как не обладают средствами объективной оценки и прогноза проведенных вмешательств. Разрабатываемая программная система является портативной, доступной и обладающей необходимым набором инструментов для предоставления точного и количественного анализа, способна решить перечисленные проблемы и тем самым усовершенствовать процесс наблюдения и диагностики.

Цель: разработать математические и нейросетевые алгоритмы, определяющие геометрию лица при помощи реперных точек.

Материалы и методы. Для обучения нейронной сети использовалась малая выборка из 1000 размеченных фотографий, находящихся в открытом доступе, на которых изображен портрет человека по плечи анфас. Рассматривались только взрослые (18+) представители европеоидной расы. Разметка фотографий производилась с помощью инструмента графического анализа изображений `labelimg1.8.6`, в котором в режиме графического интерфейса вручную отмечались области нахождения (классы определения) реперных точек. В качестве архитектуры нейронной сети выбрана YOLO 8 [8].

Все фотографии были разделены на 5 групп, принадлежность к которым могла быть явно определена, исходя из визуальных или количественных критериев (табл. 1).

Группа выборки

Таблица 1

Sample Group

Table 1

№	Признак	Название	Критерий	Число	Название	Критерий	Число
1	Гендер	Мужчины		750	Женщины		750
2	Возраст	Зрелые	18–60	920	Пожилые	61+	580
3	Телосложение	Худые и нормальные	$ИМТ \leq 25$	1140	Полные	$ИМТ > 25$	360
4	Форма лица	Квадрат Круг	Ширина лба = ширине рта	815	Удлиненное		685
5	Нарушения	Есть		1290	Нет		210

1. Определение ключевых реперных точек

Поиск реперных точек осуществляется, исходя из принципов симметрии и общих признаков геометрии лица, характерных для всех представителей выборки (рис. 1). В рамках исследования осуществляется поиск 27 основных точек [9], обозначенных заглавными латинскими буквами с индексом. В дальнейшем при анализе, например, мимики, список точек может быть расширен и дополнен точками на бровях, дополнительными точкам в области глаз, лобной части и т. п. Выбор точек зависит от решаемой задачи и для текущего исследования является полным.

Для определения реперных точек был разработан математический алгоритм по определению специальных точек на трехмерной модели (рис. 2), пространственное положение которых относительно друг друга позволяло сделать вывод о наличии тех или иных нарушений симметрии и гармонии лица. На основе алгоритма фотограмметрического построения модели математического определения пространственного положения реперных точек реализовано приложение для мобильных устройств [10], с помощью которого был проведен ряд исследований, направленных на

решение таких ортопедических задач, как оценка нарушений осанки и зубочелюстной системы [11, 12] и мониторинг динамики изменений выявленных нарушений в ходе реабилитационного процесса.

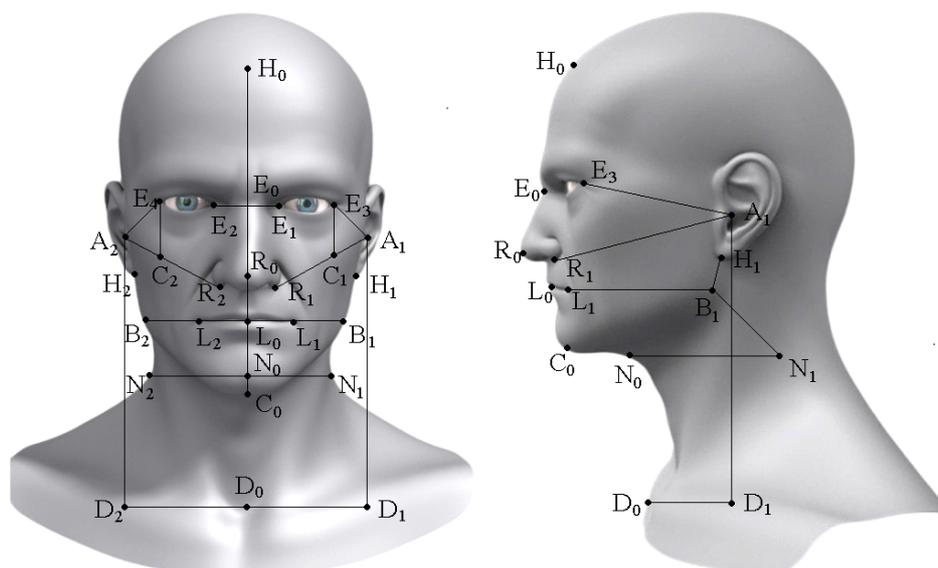


Рис. 1. Реперные точки
Fig. 1. Reference points



Рис. 2. Пример определения реперных точек
на трехмерной модели головы
Fig. 2. Example definition of reference points
on a three-dimensional head model

В дальнейшем разработка была направлена на решение задач в области эстетической косметологии, связанных с количественной оценкой нарушений геометрических параметров лица.

Разработка программного обеспечения для прикладной интерпретации параметров рельефа и цветовых характеристик лица по результатам фотограмметрической оценки трехмерного изображения головы проводилась в несколько этапов:

- 1) получение фотоснимков объекта по серии фотоснимков с метаданными;
- 2) построение трехмерного объекта головы;
- 3) определение реперных точек и их координат в пространстве;
- 4) оценка пространственного взаимоположения реперных точек;
- 5) интерпретация взаимоотношения реперных точек, формирование заключения.

2. Ограничения математического алгоритма

В ходе проведенных экспериментов на основе алгоритма фотограмметрического построения модели математического определения пространственного положения реперных точек был выявлен ряд недостатков применения в основе чистой математической модели для определения положения ключевых диагностических точек. По результатам обработки более 1000 моделей наиболее распространенными по частоте проблемами являлись неточное определение положения точек: глаз (40 %), шей (36 %), носа (4 %). Проблемы с определением других точек встретились в 17 % случаев. Анализ причин возникновения проблем показал, что зачастую на точность определения точек оказывали влияние такие факторы, как: перекрытие волосами исследуемых областей, в том числе выбившиеся пряди, наличие челки, бороды (24 %), светлые волосы (3 %) светлая одежда (3 %), светлый фон (3 %), наличие украшений (2 %). В ряде случаев искомые точки лежали за пределами заданных диапазонов (7 %). Также в 3 % случаев трехмерная модель получилась размыта по причине движения фотографируемого добровольца во время съемки либо нарушения плавности движений фотографирующего. В остальных случаях причину найти не удалось.

Для повышения качества поиска было принято решение использовать совокупность готовых нейросетевых инструментов, находящихся в свободном доступе. Обучение проводилось на моделях фотографируемых добровольцев с нанесенными в области нахождения реперных точек маркерами. В качестве маркеров использовались метки из цветной самоклеящейся бумаги диаметром 5 мм.

Далее для поиска реперных точек применялась нейросетевая обработка пространственной модели головы. Для создания виртуальной копии трехмерного объекта использовался метод фотограмметрии, включающий в себя съемку неподвижного объекта камерой смартфона с разных ракурсов с последующим восстановлением объемной модели по фотографиям на основе их уникальных признаков.

Поскольку распознавание лиц является сложной задачей в силу того, что объемное трехмерное изображение лица содержит большое количество информации, обработка и интерпретация которой делает нейронную сеть дорогостоящей в вычислительном отношении [13], было принято решение проводить поиск реперных точек на плоском снимке, выполненном анфас, и в дальнейшем переносить их на трехмерный объект. Также на этом этапе работ был осуществлен переход от готовых решений к разработке и обучению своей нейронной сети.

3. Результаты тестирования нейронной сети

В результате использования обученной нейронной сети на малой выборке размеченных фотографий удалось получить хорошее совпадение в положении реперных точек на фотографиях, не используемых для обучения. В отличие от математического алгоритма, в котором наибольшую сложность определения имели точки ушей, основные проблемы с поиском точек у нейронной сети были связаны с определением точек шеи на фотографиях, имеющих цвет одежды, сходный по оттенку с цветом кожи, а также в связи с различной длиной шеи. При этом с поиском остальных точек разработанная нейронная сеть справилась в большинстве случаев.

Для оценки полученного результата использовался ряд стандартных метрик [11, 14, 15], таких как:

- F-мера – это метрика для оценки точности алгоритмов машинного обучения, используемых в задачах классификации и семантической сегментации. Она сочетает в себе метрики точности (Precision) и полноты (Recall) в единую меру качества модели. Она помогает выбрать оптимальный порог IOU для принятия решения о наличии или отсутствии объекта на изображении при работе с алгоритмом YOLO (рис. 3a);
- Recall-Confidence Curve – это график, который отображает соотношение между полнотой (recall) и уверенностью (confidence) алгоритма машинного обучения в прогнозировании. Recall-Confidence Curve позволяет оценить, насколько хорошо алгоритм справляется с предсказанием реальных положительных примеров при разной степени уверенности. Например, если алгоритм имеет высокую полноту при низкой уверенности, это может указывать на то, что он не может достаточно точно различить истинные положительные примеры от ложных, и нужно провести дополнительную настройку модели (рис. 3b);

• Precision-Confidence Curve (кривая точность–доверие) – это график, который показывает точность модели машинного обучения в зависимости от уровня ее доверия. Он может использоваться для оценки производительности модели, отображая точность предсказаний на основе того, насколько уверена модель в своих результатах. Кривая точности-доверия может помочь оценить, какие точности вы достигаете на разных уровнях доверия к результатам модели, и может привести к более информативным метрикам производительности, чем просто точность (accuracy) или F1-мера (рис. 3с);

• Precision-Recall Curve (кривая точность–полнота) – это графическое представление производительности бинарного классификатора, которое используется для оценки эффективности модели машинного обучения в распознавании положительных и отрицательных примеров. Кривая позволяет оценить баланс между точностью и полнотой модели, настраивая пороговое значение для принятия решения о классификации (больше или меньше порогового значения). Чем выше точность и полнота, тем ближе кривая будет к левому верхнему углу графика, что является оптимальной производительностью модели (рис. 3д).

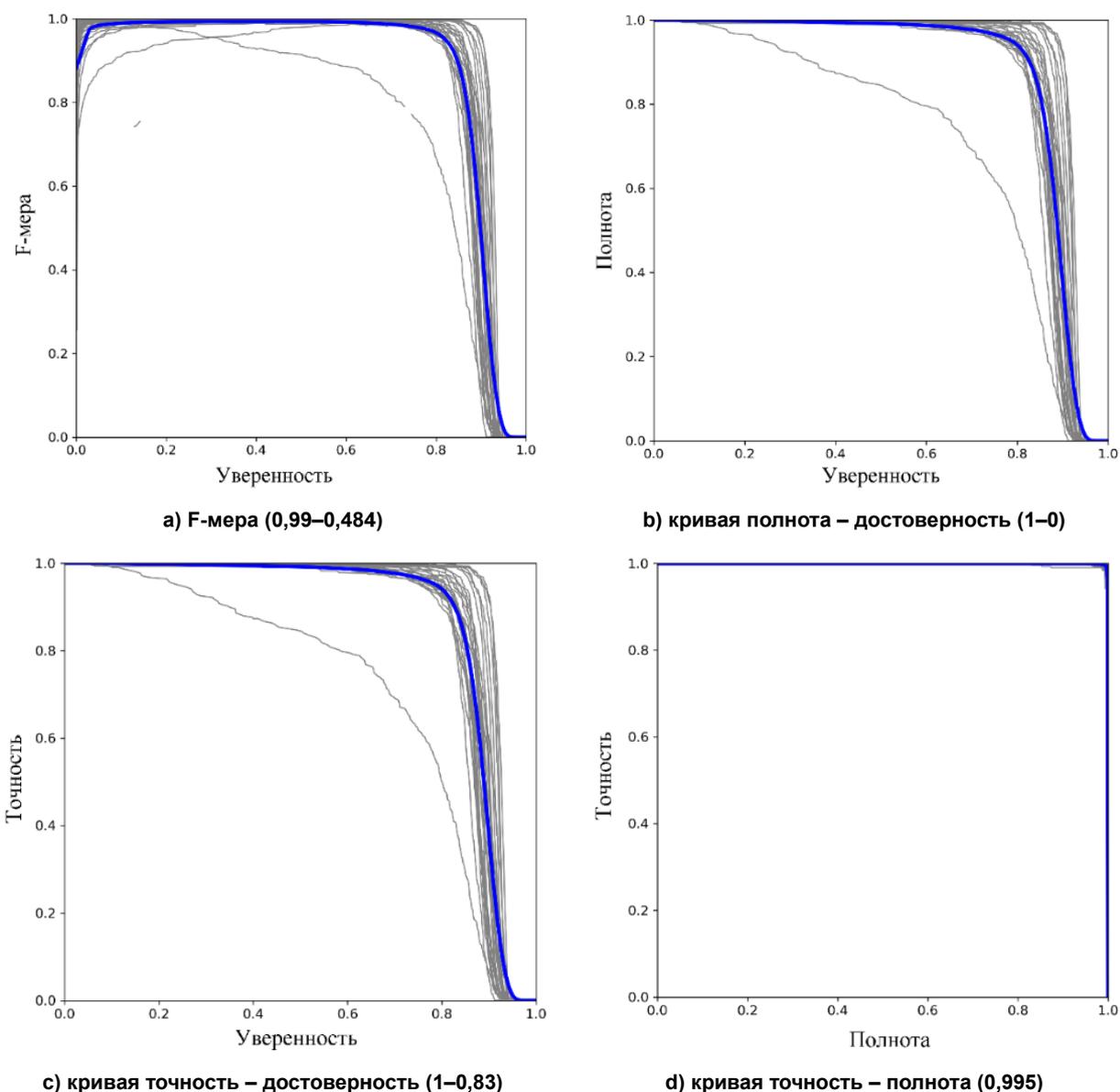


Рис. 3. Метрики оценки работы нейронной сети
Fig. 3. Metrics for evaluating the work of a neural network

Точность определяет отношение числа корректно обнаруженных объектов ко всему количеству обнаруженных объектов и вычисляется по формуле

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

Полнота определяет отношение числа корректно обнаруженных объектов ко всем объектам класса и вычисляется по формуле

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

F-мера позволяет сравнить 2 модели, одновременно оценив полноту и точность, и вычисляется по формуле

$$\text{F-мера} = \frac{2}{\frac{1}{\text{Точность}} + \frac{1}{\text{Полнота}}} \quad (3)$$

Есть всего 4 возможных исхода при выделении ограничивающих рамок и обнаружении объекта (табл. 2): истинно положительные (TP), истинно отрицательные (TN), ложно положительные (FP) и ложно отрицательные (FN). TP означает число объектов, которые модель правильно обнаруживает (положительный класс). TN обозначает количество пикселей на изображении, которые не содержат объект (отрицательный класс). FP-результат означает, что модель некорректно определила положительный класс и представляет собой некоторое количество ошибочных обнаружений, FN – количество объектов, которые модель не находит, а TN – количество пикселей на изображении, которые не содержат объект. На представленных далее результатах видно, что точность идентификации большинства реперных точек достигла 1,0.

Таблица 2
Исходы обнаружения объекта
Table 2
Object detection outcomes

Прогноз	Реальность	
	TP	FP
	FN	TN

Графики, автоматически генерируемые при работе нейронной сети YOLO8, описывают процесс обучения и результаты сети в процессе тестирования (рис. 4). В частности, график train/boxloss отображает значение функции потерь для каждой эпохи обучения, которое связано с ошибками распознавания объектов и их позиционирования (определением их координат рамок bounding boxes). Если модель ошибается в нахождении координат рамок, это ведет к высокому значению box_loss. val/cls_loss отвечает за потерю, связанную с определением классов объектов на изображении. Если модель ошибается в определении класса объекта, это ведет к высокому значению cls_loss. Соответственно val/boxloss, val/dfloss – отображают значение ошибок (loss) для каждого параметра – бокса и локализации. dfl_loss (дифференциальная функция потерь по Focal Loss'у) – это улучшенный вариант cls_loss, разработанный для борьбы с проблемой неравных значений классов, когда на изображении есть редко встречающиеся объекты. Dfl_loss помогает модели лучше справляться с такими объектами и снижать общий cls_loss.

Метрика precision (P) показывает точность (precision) обнаружения объектов на изображениях. gain/dfloss отображает значение функции потерь (ошибки) детектора лиц на этапе обучения. metrics/recall показывает, насколько полно и точно модель находит объекты, определяя, сколько объектов было найдено во всех изображениях, разделенных на общее количество объектов в этих изображениях. metrics/mAP50 и metrics/mAP50-95 показывают среднюю точность обнаружения объектов в зависимости от порога обнаружения. mAP50 показывает точность при использовании порога обнаружения в 50 %, а mAP50-95 – от 50 до 95 %.

Результаты показали, что mAP нейронной сети составил 98,15 %. Видно, что box_loss, obj_loss, а значит, и cls_loss во время обучения модели постоянно уменьшались. Средняя точность при mAP_0,5 постоянно увеличивалась. mAP_0,5 близок к 0,99, что говорит о хорошем эффекте обучения на представленном наборе данных.

В целях увеличения точности модели было произведено дообучение уже обученной модели (рис. 5) на расширенном количестве данных (500+500 фотографий) в течение 300 эпох (1200+300 эпох).

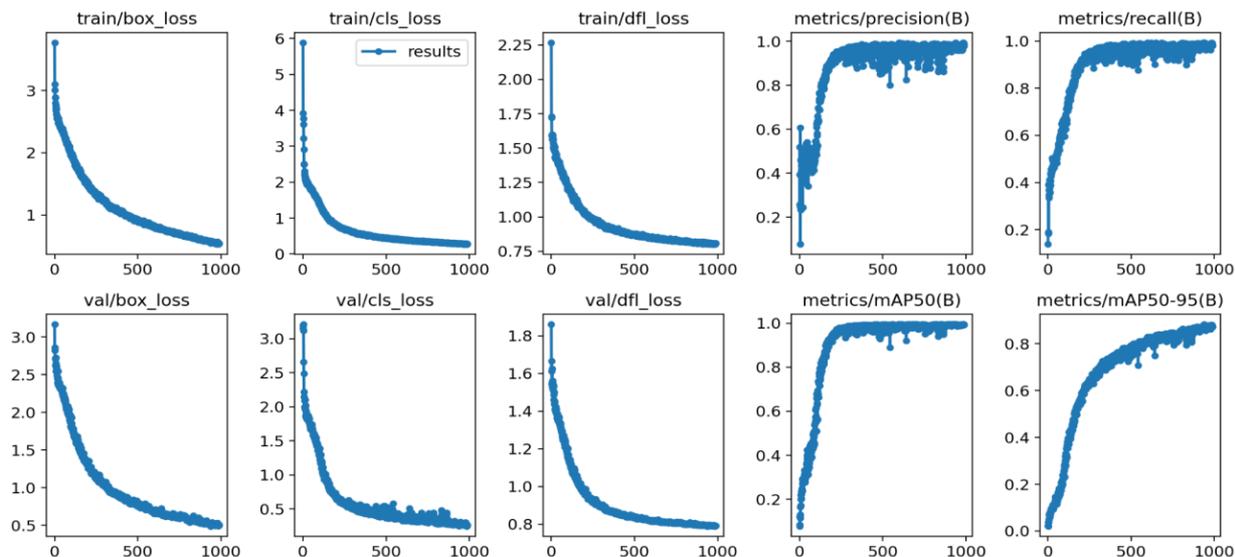


Рис. 4. График результатов обучения модели YOLO8 на 1200 эпохах
Fig. 4. Graph of learning outcomes of the YOLO8 model for 1200 epochs

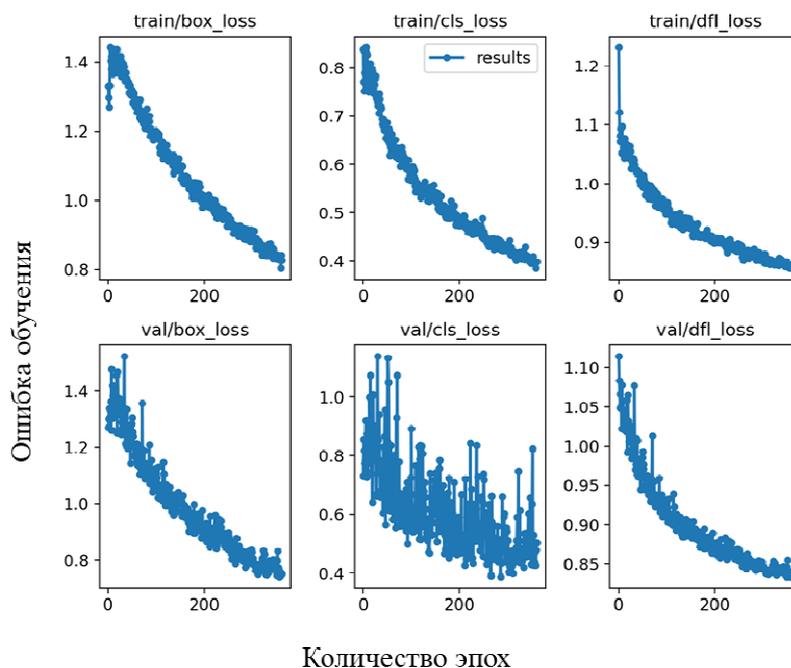


Рис. 5. График результатов дообучения модели YOLO на 1500 эпохах
Fig. 5. A graph of the results of the YOLO model training over 1500 epochs

Представленные на рис. 4 и 5 графики включают две линии – линию обучения и линию проверки. Линия обучения (train) отображает показатели производительности модели на каждой эпохе обучения на обучающих данных. Линия проверки (val) свидетельствует о том, как модель проходит проверку на проверочном наборе данных, который она не видела во время обучения. При первоначальном обучении линии train и val были близки. Однако при переобучении на обучающих данных линия обучения продолжала уменьшаться при увеличении разброса данных линии проверки. Таким образом, уменьшение промежутка между train и val линиями говорит о лучшей генерализации модели на новые данные. После дообучения модели удалось снизить количество ошибок, связанных с распознаванием и позиционированием до 0,8, определением классов до 0,4, редко встречающихся объектов до 0,9. Для оценки точности нейросетей модели в задаче обнаружения реперных точек использовалась Матрица ошибок, которая представляют собой таблицу, демонстрирующую комбинации прогнозируемых и фактических значений. Каждая строка в мат-

рице соответствует реальному классу объектов, а каждый столбец – предсказанному классу (рис. 6). На основе матрицы ошибок можно вычислить различные метрики, такие как точность, полнота, точность предсказания и F1-меру.

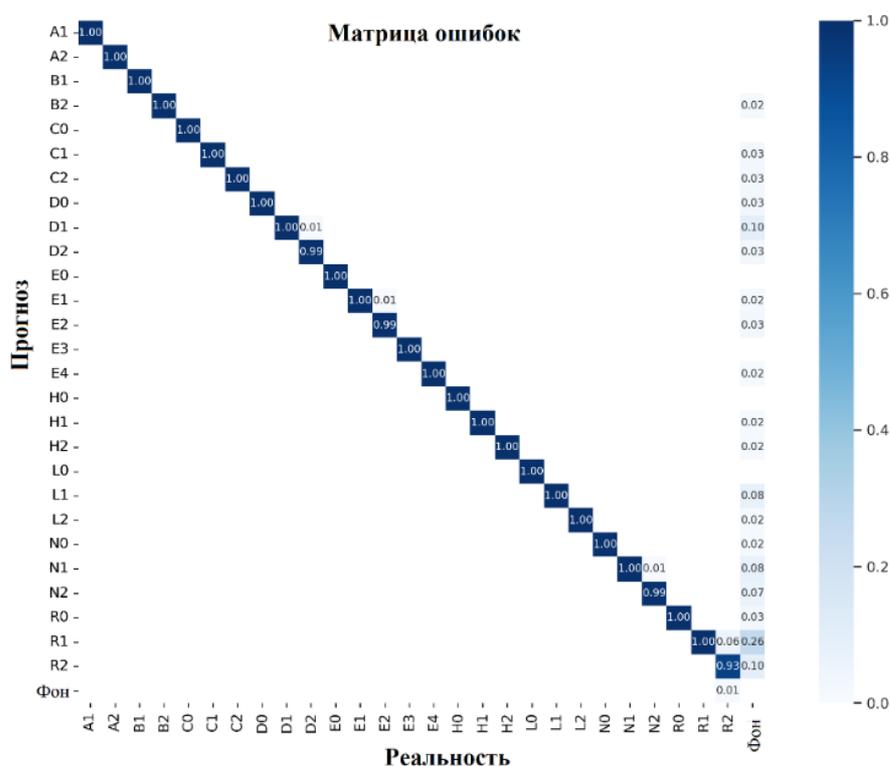


Рис. 6. Матрица ошибок модели
Fig. 6. Matrix of model errors

4. Результаты

Опираясь на расположение точек, определенных нейросетью на фотографии человека анфас, методами фотограмметрии на основе фотографий, сделанных с других ракурсов камерой мобильного устройства и при помощи специально разработанных алгоритмов, строится трехмерная модель головы, на которую переносятся найденные точки (рис. 7).



Рис. 7. Определение реперных точек на трехмерной модели
Fig. 7. Definition of reference points on a three-dimensional model

На основе полученных реперных точек на трехмерной модели, выполняя их проекцию на фронтальную и сагиттальную плоскости, можно построить треугольники, для которых можно посчитать значения углов в градусах, образуемые в районе вершины точки A_0 (табл. 3). При этом точка A_0 является серединой отрезка A_1A_2 .

Таблица 3

Угловые показатели фактической сагиттальной поверхности

Table 3

Angular indices of the actual sagittal surface

Вид сбоку		Вид спереди	
Обозначение	Значение угла, °	Обозначение	Значение угла, °
$\alpha (A_1, A_0, D_0)$	5,113	$\alpha (A_1, A_0, D_0)$	92,251
$\beta (D_0, A_0, N_0)$	18,038	$\beta (D_0, A_0, N_0)$	92,913
$\gamma (N_0, A_0, C_0)$	14,726	$\gamma (N_0, A_0, C_0)$	91,91
$\delta (C_0, A_0, L_0)$	22,645	$\delta (C_0, A_0, L_0)$	86,397
$\varepsilon (L_0, A_0, R_0)$	18,449	$\varepsilon (L_0, A_0, R_0)$	90,0
$\zeta (R_0, A_0, E_0)$	21,609	$\zeta (R_0, A_0, E_0)$	90,0
$\eta (E_0, A_0, H_0)$	30,562	$\eta (E_0, A_0, H_0)$	87,194

По абсолютным значениям отрезков, образованных одной гомо- и второй гетеролатеральной непарными точками, можно произвести расчет архитектуры и гармонии лица (табл. 4).

Таблица 4

Абсолютные значения длины отрезков, образованных непарными точками

Table 4

Absolute values of the length of segments formed by unpaired points

№ п/п		5	12	13	18	21	24	27
№ п/п	Буквенное обозначение	C_0	E_0	H_0	N_0	R_0	L_0	D_0
5	C_0	0,0						
12	E_0	20,89	0,0					
13	H_0	3,43	17,46	0,0				
18	N_0	30,22	9,33	26,79	0,0			
21	R_0	14,28	6,61	10,85	15,94	0,0		
24	L_0	9,34	11,56	5,91	20,89	4,95	0,0	
27	D_0	7,48	28,36	10,9	37,69	21,75	16,81	0,0

Для анализа рельефа (табл. 5) вычисляются следующие показатели по формулам:

$$K_S = 100 \% \frac{S_n}{S_{cn}}; \quad (4)$$

$$K_V = 100 \% \frac{V_n}{V_{cn}}, \quad (5)$$

где n – порядковый номер региона; S – площадь; V – объем; Δ – разница между показателями K_S и K_V на фотографиях справа (S) и сбоку (D) соответственно.

Таблица 5

Анализ рельефа

Table 5

Relief analysis

Номер региона	S	D	S	D	K_S	K_V
	K_S	K_S	K_V	K_V	Δ	Δ
1	0,99	1,01	15,34	0	0,01	15,34
2	0,2	0,2	13,43	0,0	0,0	13,43
3	0,76	0,78	75,91	0,0	0,03	75,91
4	3,76	4,14	1209,8	0,0	0,37	1209,8
5	1,66	1,7	98,92	0,0	0,03	98,92
6	1,08	1,1	95,21	0,0	0,02	95,21
7	2,05	2,31	173,09	0,0	0,26	173,09
8	1,65	2,51	1434,56	0,0	0,86	1434,56
9	0,67	0,78	34,68	0,0	0,11	34,68
10	2,02	2,53	1704,65	0,0	0,51	1704,65
11	28,97	38,5	23 121,83	0,0	9,52	23 121,83
12	0,82	0,92	51,17	0,0	0,1	51,17

Заключение

В рамках проведенного исследования был выполнен поиск специальных (реперных точек), определяющих геометрию лица при помощи разработанных математических и нейросетевых алгоритмов. Было показано, что точность поиска точек обученной на 1000 сгруппированных фотографиях нейронной сетью значительно выше, чем при использовании исключительно математической модели. Определенные на фотографии точки были перенесены на полученную с помощью разработанной авторами фотограмметрической методики трехмерную модель. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования разработанной авторами методики в области косметологии и потенциала ее использования в других областях медицины, включая стоматологию, неврологию и хирургию.

Список литературы

1. Paniego S., Sharma V., Cañas J.M. Open-source assessment of deep learning visual object detection // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 12. P. 4575. DOI: 10.3390/s22124575
2. Artificial intelligence in medico-dental diagnostics of the face: a narrative review of opportunities and challenges / R. Patcas, M.M. Bornstein, M.A. Schätzle, R. Timofte // *Clinical Oral Investigations*. 2022. Vol. 26, no. 12. P. 6871–6879. DOI: 10.1007/s00784-022-04724-2
3. Review on facial-recognition-based applications in disease diagnosis / J. Qiang, D. Wu, H. Du et al. // *Bioengineering*. 2022. Vol. 9, no. 7. P. 273. DOI: 10.3390/bioengineering9070273
4. Rahouma K.H., Mahfouz A.Z. Design and implementation of a face recognition system based on API mobile vision and normalized features of still images // 18th International Learning & Technology Conference. 2021. P. 32–44. DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.057
5. Meena G., Mohbey K.K., Kumar S. Sentiment analysis on images using convolutional neural networks-based Inception-V3 transfer learning approach // *International journal of information management data insights*. 2023. Vol. 3 (1). P. 100174. DOI: 10.1016/j.jjime.2023.100174
6. Akhgar B., Yates S. *Strategic Intelligence Management*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 340 p.
7. Maio M. MD Codes™: A methodological approach to facial aesthetic treatment with injectable hyaluronic acid fillers // *Aesth Plast Surg*. 2021. Vol. 45, no. 2. P. 690–709. DOI: 10.1007/s00266-020-01762-7
8. Geometric analysis and YOLO algorithm for automatic face detection system in a security setting / F.E. Ayo, A.M. Mustapha, J.A. Braimah, D.A. Aina // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2199, no. 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2199/1/012010
9. Tie Y., Guan L. Automatic landmark point detection and tracking for human facial expressions // *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2013. Vol. 8. P. 1–15. DOI: 10.1186/1687-5281-2013-8
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667399 Российская Федерация. Программное обеспечение для регистрации реперных точек поверхности головы человека методом фотограмметрии / И.Д. Шитоев, С.В. Муравьев; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Йорд Тех». № 2022666812; заявл. 15.09.2022; опублик. 20.09.2022.
11. Тимошкин М.С., Миронов А.Н., Леонтьев А.С. Сравнение YOLO v5 и Faster R-CNN для обнаружения людей на изображении в потоковом режиме // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 6 (120). С. 137–146. DOI: 10.23670/IRJ.2022.120.6.020
12. Цифровые модели и инструменты для диагностики трехмерной деформации позвоночника на основе данных стереофотограмметрии / И.Д. Шитоев, В.Ю. Столбов, С.В. Муравьев и др. // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2022. № 4. С. 60–82. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.4.04
13. Bhople A.R., Shrivastava A.M., Prakash S. Point cloud based deep convolutional neural network for 3D face recognition // *Multimedia Tools and Applications*. 2020. Vol. 80. P. 30237–30259. DOI: 10.1007/s11042-020-09008-z
14. Sanchez S.A Romero H.J Morales A.D. A review: comparison of performance metrics of pretrained models for object detection using the TensorFlow framework // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 844. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/844/1/012024

15. Дудченко П.В. Метрики оценки классификаторов в задачах медицинской диагностики // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных / Томский политехнический университет – Томск: 2019. 164–165 с.

References

1. Paniego S., Sharma V., Cañas J.M. Open-source Assessment of Deep Learning Visual Object Detection. *Sensors*. 2022;22(12):4575. DOI: 10.3390/s22124575
2. Patcas R., Bornstein M.M., Schätzle M.A., Timofte R. Artificial Intelligence in Medico-Dental Diagnostics of The Face: A Narrative Review of Opportunities and Challenges. *Clinical Oral Investigations*. 2022;26(12):6871–6879. DOI: 10.1007/s00784-022-04724-2
3. Qiang J., Wu D., Du H., Zhu H., Chen S., Pan H. Review on Facial-recognition-based Applications in Disease Diagnosis. *Bioengineering*. 2022;9(7):273. DOI: 10.3390/bioengineering9070273
4. Rahouma K.H., Mahfouz A.Z. Design and Implementation of a Face Recognition System Based on API Mobile Vision and Normalized Features of Still Images. In: *18th International Learning & Technology Conference*. 2021. P. 32–44. DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.057
5. Meena G., Mohbey K.K., Kumar S. Sentiment Analysis on Images Using Convolutional Neural Networks-Based Inception-V3 Transfer Learning Approach. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2023;3(1):100174. DOI: 10.1016/j.ijime.2023.100174
6. Akhgar B., Yates S. *Strategic Intelligence Management*. Oxford, Butterworth-Heinemann; 2013. 340 p.
7. Maio M. MD Codes™: A Methodological Approach to Facial Aesthetic Treatment with Injectable Hyaluronic Acid Fillers. *Aesth Plast Surg*. 2021;45(2):690–709. DOI: 10.1007/s00266-020-01762-7
8. Ayo F.E., Mustapha A.M., Braimah J.A., Aina D.A. Geometric Analysis and YOLO Algorithm for Automatic Face Detection System in a Security Setting. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2199(1):012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2199/1/012010
9. Tie Y., Guan L. Automatic Landmark Point Detection and Tracking for Human Facial Expressions. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2013;8:1–15. DOI:10.1186/1687-5281-2013-8
10. Shitoev I.D., Muravev S.V. *Programmnoe obespechenie dlya registratsii reperykh toчек poverkhnosti golovy cheloveka metodom fotogrammetrii* [Software for Registration of Reference Points of the Human Head Surface by Photogrammetry]. Certificate of state registration of a computer program no. 2022667399 Russian Federation, 2022. (In Russ.)
11. Timoshkin M.S., Mironov A.N., Leontev A.S. Comparison of YOLO v5 and Faster R-CNN for Detecting People in the Image in Streaming Mode. *International Research Journal*. 2022;6(120):137–146. (In Russ.) DOI: 10.23670/IRJ.2022.120.6.020
12. Shitoev I.D., Stolbov V.Y., Muravyev S.V., Nikitin V.N., Kloyan G.Z. Digital Models and Tools for Diagnosing Three-Dimensional Spinal Deformity Based on Stereophotogrammetry Data. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2022;(4):60–82. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499–9873/2022.4.04
13. Bhople A.R., Shrivastava A.M., Prakash S. Point cloud based deep convolutional neural network for 3D face recognition. *Multimedia Tools and Applications*. 2020;80:30237–30259. DOI: 10.1007/s11042-020-09008-z
14. Sanchez S.A Romero H.J Morales A.D. A Review: Comparison of Performance Metrics of Pretrained Models for Object Detection Using the TensorFlow Framework. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;844:012024. DOI: 10.1088/1757-899X/844/1/012024
15. Dudchenko P.V. [Metrics for Classifier Evaluation in Medical Diagnostic Tasks]. In: *Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Modern Information Technologies: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tomsk; 2019. P. 164–165. (In Russ.)

Информация об авторах

Шитоев Иван Дмитриевич, ассистент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; генеральный директор, ООО «Йорд Тех», Пермь, Россия; ShitoevID@yord.tech.

Муравьев Сергей Владимирович, канд. мед. наук, доц. кафедры физической и реабилитационной медицины, ведущий специалист международного отдела управления международного медицинского образования, Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера, Пермь, Россия; научный руководитель, Научно-медицинский центр «Родник», Пермь, Россия; sergey89.m@mail.ru.

Иванова Мария Дмитриевна, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; ivanova-mashaa@mail.ru.

Клоян Гаянэ Зурабиевна, биомеханик, ООО «Йорд Тех», Пермь, Россия; kloyang@mail.ru.

Information about the authors

Ivan D. Shitoev, Assistant of the Department of Computational Mathematics, Mechanics, Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; Chief Executive Officer, LLC “Yord Tech”, Perm, Russia; ShitoevID@yord.tech.

Sergey V. Muravev, Cand. Sci. (Med.), Ass. Prof. of the Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Leading Specialist of the International Department of the International Medical Education, Academician Ye.A. Vagner Perm State Medical University, Perm, Russia; Scientific Director, Scientific and Medical Center “Rodnik”, Perm, Russia; sergey89.m@mail.ru.

Maria D. Ivanova, Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics, Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; ivanova-mashaa@mail.ru.

Gayane Z. Kloyan, Biomechanist, LLC “Yord Tech”, Perm, Russia; kloyang@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 25.06.2024

The article was submitted 25.06.2024

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 519.7:621.357.7
DOI: 10.14529/ctcr240303

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ И РОЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

А.Г. Лютов¹, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

А.Р. Ишкулова², Aliya.Ishkulova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4672-4025>

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Одним из ключевых параметров качества гальванических покрытий является его толщина, которая должна соответствовать техническим требованиям и обеспечивать необходимую степень защиты от коррозии, износостойкость и внешний вид покрытия. Обеспечение равномерности гальванического покрытия является одной из важных и сложных задач высокотехнологичного машиностроительного производства, для решения которой предложен ряд методов, таких как управление токовыми режимами, расположением электродов в ванне, скоростью потока электролита. Однако в большинстве случаев эти методы требуют решения задачи оптимального многопараметрического управления. Оперативная и точная оптимизация при изменении условий электролиза (электродных потенциалов, состава и свойств электролита), а также при необходимости учета многоэкстремального характера зависимости коэффициента равномерности от параметров процесса (плотности тока, межэлектродного расстояния, скорости потока электролита) является достаточно сложной и неоднозначной многофакторной задачей, ограничивающей применение классических методов для поиска глобального экстремума. В статье исследуется возможность и целесообразность использования интеллектуальных эвристических методов, таких как эволюционные и роевые, для решения данной задачи. **Цель.** Целью данного исследования является определение эффективности применения генетических алгоритмов и метода роя частиц для решения задачи оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванических покрытий. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы методы математического моделирования, методы и программные среды численного моделирования и оптимизации. **Результаты.** В статье произведены исследования эффективности применения эволюционных и роевых методов оптимизации применительно к процессу нанесения хромового покрытия в гальванической ванне с многими анодами при многопараметрическом управлении плотностью тока, межэлектродным расстоянием и скоростью потока электролита. Наилучшего приближения к экстремуму коэффициента равномерности позволяют достигнуть генетические алгоритмы с использованием операции мутации и метода роя частиц, при этом достижение экстремума с применением метода роя частиц достигается за меньшее количество итераций. **Заключение.** Результаты исследования обосновывают целесообразность применения эволюционных и роевых методов решения задачи оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванических покрытий, при этом можно добиться повышения эффективности данных методов за счет дополнительной настройки.

Ключевые слова: оптимизация, многопараметрическое управление, гальваническое покрытие, генетический алгоритм, метод роя частиц

Для цитирования: Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Применение эволюционных и роевых методов для оптимизации многопараметрического управления процессом нанесения гальванического покрытия // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 29–39. DOI: 10.14529/ctcr240303

APPLICATION OF EVOLUTIONARY AND SWARM METHODS TO OPTIMIZE THE MULTIPARAMETRIC CONTROL OF THE ELECTROPLATING PROCESS

A.G. Lyutov¹, lyutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

A.R. Ishkulova², Aliya.Ishkulova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4672-4025>

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. One of the key parameters of the quality of ceramic coatings is its thickness, which must meet technical requirements and provide the necessary degree of corrosion protection, wear resistance and appearance of the coating. Ensuring the uniformity of the galvanic coating is one of the most important and complex tasks of high-tech machine-building production, for which a number of methods have been proposed, such as controlling current modes, the location of electrodes in the bath, and the electrolyte flow rate. However, in most cases, these methods require solving the problem of optimal multiparametric control. Prompt and accurate optimization when changing the conditions of electrolysis (electrode potentials, composition and properties of the electrolyte), as well as, if necessary, taking into account the multi-extreme nature of the dependence of the uniformity coefficient on the process parameters (current density, interelectrode distance, electrolyte flow rate) is a rather complex and ambiguous multifactorial task that limits the use of classical methods for the claim of a global extreme. The article explores the possibility and expediency of using intelligent heuristic methods, such as evolutionary and swarm methods, to solve this problem. **Objective.** The objective of this study is to determine the effectiveness of using genetic algorithms and the particle swarm method to solve the problem of optimizing the multiparametric control of the electroplating process. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling, methods and software environment of numerical modeling and optimization were used to conduct the study. **Results.** The article investigates the effectiveness of the application of evolutionary and swarm optimization methods in relation to the process of applying chrome plating in a galvanic bath with many anodes with multiparametric control of current density, interelectrode distance and electrolyte flow rate. The best approximation to the extreme of the uniformity coefficient can be achieved by genetic algorithms using the mutation operation and the particle swarm method, while achieving the extreme using the particle swarm method is achieved in fewer iterations. **Conclusion.** The results of the study substantiate the expediency of using evolutionary and swarm methods to solve the problem of optimizing the multiparametric control of the electroplating process, while it is possible to increase the efficiency of these methods due to additional tuning.

Keywords: optimization, multiparametric control, electroplating, genetic algorithm, particle swarm method

For citation: Lyutov A.G., Ishkulova A.R. Application of evolutionary and swarm methods to optimize the multiparametric control of the electroplating process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):29–39. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240303

Введение

Гальванические покрытия (ГП) широко используются в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая коррозионная стойкость, износостойкость и привлекательный внешний вид. Однако процесс нанесения ГП является сложным и требует оптимизации для достижения равномерности и качества.

К качеству ГП предъявляют высокие требования. Покрытия должны обладать требуемой микротвердостью, шероховатостью, равномерностью, прочностью сцепления с поверхностью изделия и декоративными свойствами (глянцевое, матовое, цвет покрытия).

Равномерность покрытия является одним из ключевых параметров, определяющих качество и эффективность процесса нанесения ГП. Равномерное покрытие обеспечивает равномерное распределение металла на поверхности детали, что приводит к улучшению коррозионной стойкости, износостойкости и внешнего вида изделия. Кроме того, равномерность покрытия влияет на рав-

номерность электрохимического потенциала, что, в свою очередь, определяет эффективность процесса нанесения ГП.

В процессе нанесения ГП производят регулирование технологических параметров, таких как плотность тока, расположение электродов в ванне, скорость потока электролита, температура, значения которых непосредственно сказываются на равномерности распределения толщины покрытия.

1. Постановка задачи

С целью улучшения равномерности распределения толщины ГП на сегодняшний день предложено множество методов, которые можно объединить в следующие группы:

- регулирование тока и режимов его подачи [1–5];
- выбор оптимального размещения электродов в ванне [6–9];
- совместное регулирование плотностью тока, расположением электродов и скоростью потока электролита [10, 11].

Вышеуказанные методы управления процессом нанесения ГП для получения наилучшего результата по критерию равномерности требуют решения задачи определения оптимального многопараметрического управления, которое осуществляется с использованием математической модели процесса осаждения ГП. Пример одной из таких моделей приведен в работе [12]. При этом задача оптимизации управления сводится к максимизации коэффициента равномерности покрытия K_p за счет регулирования плотности тока i , межэлектродного расстояния l и интенсивности перемешивания электролита u в процессе осаждения ГП:

$$K_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h_{\min}(t)}{h_i(x, y, z, t)} \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях на допустимые значения

$$h_{\min} > h_{\text{зад}}, \quad i_{\min} < i < i_{\max}, \quad l_{\min} < l < l_{\max}, \quad u_{\min} < u < u_{\max}. \quad (2)$$

В выражении (1): h_{\min} – минимальная толщина покрытия; h_i – толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода; n – количество точек определения толщины покрытия на поверхности изделия.

Часть процессов управления нанесением ГП связана со статическими (квазистатическими) режимами, при которых определение оптимальных режимных параметров осуществляется априори (перед началом процесса) и не требует часто повторяющихся быстродействующих оптимизационных процедур в ходе процесса.

Другая часть процессов управления (регулирования) связана с динамическими режимами, обусловленными в основном различного рода перемещениями и переключениями электродов, изменениями режимов подачи тока в ходе процесса и т. д. В этом случае происходит изменение условий оптимизации (режимных параметров, структуры и параметров математической модели, ограничений), что обуславливает необходимость оперативного (согласованного с темпом динамических режимов) определения значения регулируемых параметров, при которых будет поддерживаться экстремум целевого критерия в изменяющихся условиях осаждения покрытия. Очевидно, что здесь требуется достаточное быстродействие используемых методов поиска экстремума.

В обоих случаях необходима высокая точность приближения к экстремуму, так как это определяет наряду с быстродействием точность поддержания оптимальных режимов нанесения ГП как в статических, так и в динамических режимах.

При этом необходимо отметить, что решение оптимизационных задач для каждого метода имеет ряд сложностей, связанных с многоэкстремальным и овражным характером зависимости значения целевой функции – равномерности распределения толщины покрытия от технологических параметров [13], а также от условий осаждения покрытий вследствие изменения таких параметров, как концентрация электролита, его проводимости, потенциалов электродов, толщины диффузионного слоя ионов осаждаемого металла у поверхности катода.

В качестве примера на рис. 1 приведены трехмерные зависимости равномерности покрытия (полученные с использованием упомянутой выше модели процесса нанесения ГП [12]) от плотности тока, межэлектродного расстояния, интенсивности перемешивания, температуры и концентрации ионов осаждаемого металла в электролите.

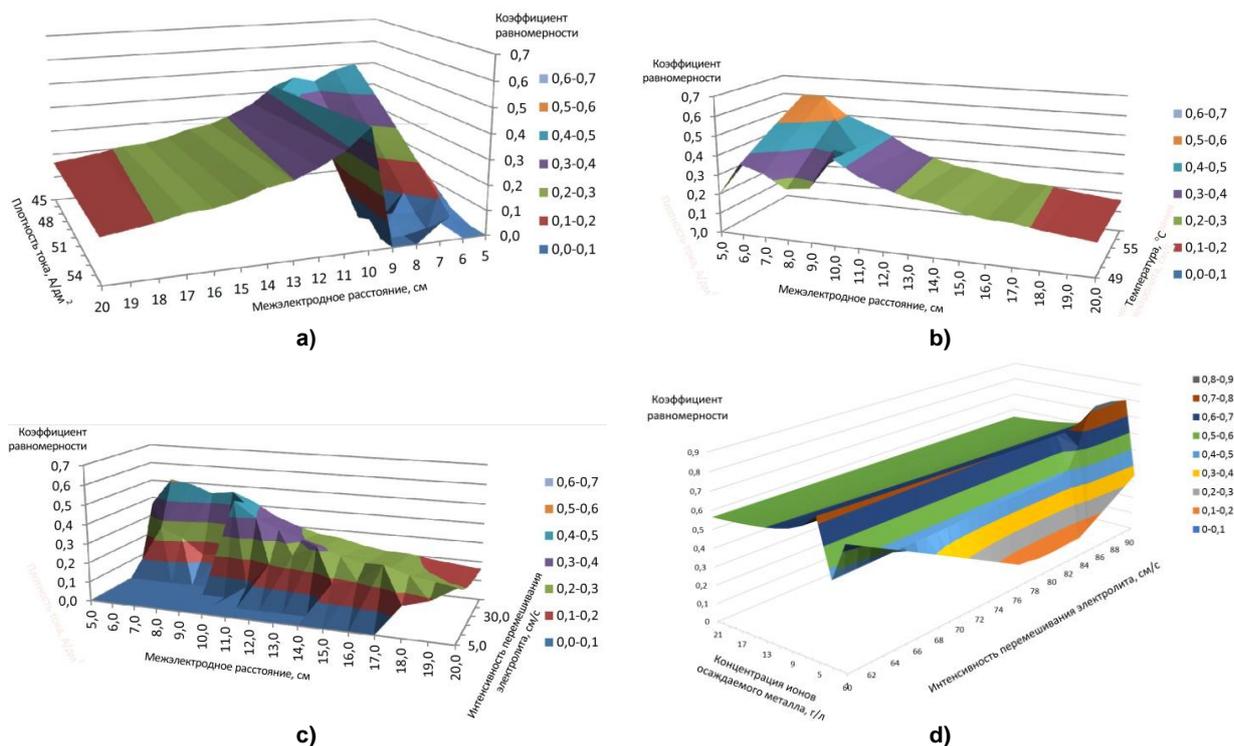


Рис. 1. Зависимость равномерности покрытия от плотности тока и межэлектродного расстояния (а), температуры электролита и межэлектродного расстояния (б), интенсивности перемешивания электролита и межэлектродного расстояния (с), интенсивности перемешивания электролита и концентрации ионов осаждаемого металла (д)

Fig. 1. The dependence of the uniformity of the coating on the current density and the interelectrode distance (a), the temperature of the electrolyte and the interelectrode distance (b), the intensity of mixing of the electrolyte and the interelectrode distance (c), the intensity of electrolyte mixing and the concentration of ions of the deposited metal (d)

Очевидно, что увеличение числа одновременно регулируемых параметров процесса, расширяющих пространство поиска, многократно усиливает упомянутые выше трудности решения оптимизационной задачи.

Таким образом, требуется решить задачу быстродействующей, точной многопараметрической оптимизации управления нанесением ГП в условиях многоэкстремального характера многомерной поверхности поиска.

Использование классических методов поиска экстремума (полного перебора, покоординатного, наискорейшего и градиентного спуска и т. д.) приводит к значительному числу расчетов, большой вероятности попадания в локальный экстремум, снижению быстродействия из-за овражных ситуаций, невысокой точности приближения к точке экстремума, существенной зависимости от точки начального приближения [13].

Поскольку задачу оптимального управления ГП ввиду ее многопараметрического и многоэкстремального характера, требуемого быстродействия при изменении условий оптимизации, можно отнести к классу сложных задач, то данные обстоятельства требуют выбора более подходящих современных методов поиска экстремума.

Одним из эффективных подходов является использование методов, основанных на технологиях искусственного интеллекта, в частности эвристических методов глобального поиска, таких как эволюционные (генетические) алгоритмы и метод роя частиц.

2. Генетические алгоритмы

Генетические алгоритмы (ГА) основаны на принципах естественного отбора и эволюции. Они представляют собой итерационный процесс, в котором популяция возможных решений (особей) подвергается процессу отбора, скрещивания и мутации.

Отбор особей осуществляется на основе их приспособленности – функции, которая определяет, насколько хорошо особь решает поставленную задачу. Скрещивание особей приводит

к образованию новых решений, которые наследуют лучшие качества своих родителей. Мутация позволяет внести разнообразие в популяцию и избежать застоя в процессе поиска оптимального решения. Основные этапы поиска экстремума с использованием ГА представлены в табл. 1.

Основные этапы поиска экстремума с использованием ГА

Таблица 1

The main stages of the extremum search using genetic algorithms

Table 1

№	Этап	Содержание этапа
1	Определение задачи	Формулировка задачи оптимизации с определением целевой функции и ограничений
2	Генерация начальной популяции	Создание начальной популяции хромосом, представляющих возможные решения
3	Оценка хромосом	Оценка приспособленности каждой хромосомы на основе целевой функции
4	Скрещивание хромосом	Пара хромосом выбирается случайным образом и скрещивается, чтобы создать две новые. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет создано определенное количество новых хромосом
5	Мутация хромосом	Случайная мутация некоторых хромосом с целью внесения разнообразия в популяцию
6	Отбор хромосом	Хромосомы с высокой приспособленностью имеют больше шансов быть выбранными для скрещивания и передачи своих генов следующим поколениям
7	Проверка на достижение оптимального решения	Если оптимальное решение найдено, алгоритм останавливается. В противном случае выполняется переход к этапу генерации нового поколения
8	Обновление популяции	Хромосомы, выбранные для скрещивания, формируют новое поколение. Невыбранные также переходят в данное поколение с некоторыми модификациями
9	Повторение этапов 3–8	До достижения заданного числа поколений или оптимального решения

В частности, хромосомы v_i могут быть представлены в виде строки битов. Кодирование в бинарной строке оптимизируемых параметров производится предварительным определением требуемого числа битов j для каждого параметра и находится по следующей формуле [14]:

$$2^{j-1} < (x_{\max} - x_{\min}) \cdot 10^{n_x} \leq 2^j - 1, \quad (3)$$

где x_{\min} , x_{\max} – минимальное и максимальное значение оптимизируемого параметра; n_x – длина хромосомы параметра x . Обратное преобразование закодированных параметров производится по формуле

$$x_i = x_{\min} + v_i \cdot \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^j - 1}. \quad (4)$$

ГА обладают следующими преимуществами:

- универсальность: могут решать широкий круг задач оптимизации;
- эффективность: в отличие от других методов, не требуют знания производных целевой функции, что делает их более гибкими;
- эвристическая природа: позволяет им находить хорошие решения за относительно короткое время.

В то же время ГА обладают рядом недостатков:

- требовательность к вычислительным ресурсам: из-за большого числа итераций и возможных комбинаций при поиске решений;
- невозможность полностью гарантировать нахождение оптимального решения: как и другие методы оптимизации, ГА могут не находить оптимальное решение в некоторых случаях;

– сложность настройки: такие параметры, как размер популяции, вероятность мутации и скрещивания, должны быть настроены для каждой задачи, что может потребовать значительных ресурсов.

3. Роевой метод

Метод роя частиц (МРЧ) основан на имитации поведения социальных животных, таких как птицы или рыбы. В этом методе каждая частица (решение) имеет свою позицию и скорость, которые изменяются в процессе взаимодействия с другими частицами роя.

Каждая частица стремится к наилучшему решению, которое она знает (глобальный оптимум), и к своему наилучшему решению (личный оптимум). Таким образом, частицы обмениваются информацией о своих позициях, и весь рой координированно перемещается в направлении областей с лучшими решениями. Основные этапы поиска оптимального решения методом МРЧ представлены в табл. 2 [15].

Основные этапы поиска оптимального решения методом МРЧ

Таблица 2

The main stages of the search for the optimal solution by the particle swarm method

Table 2

№	Этап	Содержание этапа
1	Генерация начальных позиций частиц	Каждой частице присваивается случайная позиция в пространстве поиска
2	Обновление позиций частиц	Для каждой частицы обновляется ее позиция на основе ее скорости и информации о лучшей найденной позиции
3	Проверка на нахождение глобального оптимума	Если частица нашла лучшее решение, то она запоминает его как глобальное оптимальное решение
4	Обновление скоростей частиц	Каждая частица обновляет свою скорость на основе информации о лучшем найденном решении и лучших решениях, найденных другими частицами
5	Обновление позиций частиц	С учетом новых скоростей
6	Проверка окончания работы алгоритма	Если выполнено определенное количество итераций или если все частицы находятся в окрестности глобального оптимального решения, то алгоритм останавливается и возвращает найденное оптимальное решение. Иначе возврат к шагу 2

Новая позиция частицы определяется в соответствии со сведениями о найденных оптимумах и вычисляется по формуле

$$v_{i,j} = v_{i,j} + a_1 \cdot rand(0,1) \cdot (P_{best_i} - x_{i,j}) + a_2 \cdot rand(0,1) \cdot (G_{best_i} - x_{i,j}), \quad (5)$$

где $v_{i,j}$ – вектор скорости i -й частицы по j -й координате; a_1, a_2 – постоянные ускорения; P_{best_i} – лучшая найденная частицей точка; G_{best_i} – лучшая точка, найденная всеми частицами системы; $x_{i,j}$ – текущее положение i -й частицы по j -й координате; $rand(0,1)$ – функция, возвращающая случайное число от 0 до 1.

Основным преимуществом МРЧ является его простота и эффективность. Он не требует вычисления производных целевой функции и может работать с функциями любой сложности. Кроме того, МРЧ обладает хорошей сходимостью к глобальному оптимуму и может быть легко распараллелен.

К недостаткам МРЧ можно отнести следующее. Во-первых, метод может быть чувствителен к выбору начальных параметров, таких как количество частиц, скорость обучения и т. д. Во-вторых, МРЧ может страдать от проблемы «сцепления», когда частицы «прилипают» к локальным оптимумам и не могут их покинуть. В-третьих, метод требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при работе с большими размерностями пространства поиска.

4. Сравнительная характеристика методов

Хотя ГА и МРЧ имеют разные механизмы поиска решений, они имеют и общие черты. Так, оба метода являются стохастическими, то есть они используют случайность для выбора особей или частиц, что позволяет находить различные варианты решений. Однако ГА больше подходит для решения задач с дискретным пространством поиска, так как он использует скрещивание особей. МРЧ же лучше подходит для задач с непрерывным пространством, поскольку он позволяет частицам перемещаться в любых направлениях и на любые расстояния.

Для обоих методов требуется настройка параметров для оптимальной работы. ГА требуются параметры, такие как вероятность скрещивания, мутации, размер популяции и другие. МРЧ требует настройки параметров скорости обучения, количества частиц и других.

Если нужна высокая точность и нахождение глобального оптимума, то генетические алгоритмы ГА могут быть лучшим выбором, а если требуется быстрое решение простой задачи, то МРЧ будет предпочтительнее.

Таким образом, эвристические алгоритмы, такие как ГА и МРЧ, являются одним из эффективных подходов к оптимизации сложных систем и процессов. Однако выбор между ГА и МРЧ зависит от характеристик решаемой задачи и требуемого результата.

В контексте оптимизации процесса нанесения ГП эвристические алгоритмы могут показать высокую эффективность поиска оптимальных параметров процесса, которые обеспечивают наилучшую равномерность покрытия.

5. Пример численной оптимизации

Применение ГА и МРЧ рассмотрим на примере оптимизации процесса хромирования стальной детали в многоанодной ванне, представленной на рис. 2.

Расчет производился при помощи математической модели, представленной в работе [12], при следующих параметрах электролиза: состав электролита – CrO_3 (250 г/л), H_2SO_4 (25 г/л); температура электролита – 55°C ; удельная электропроводность – $0,0166 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

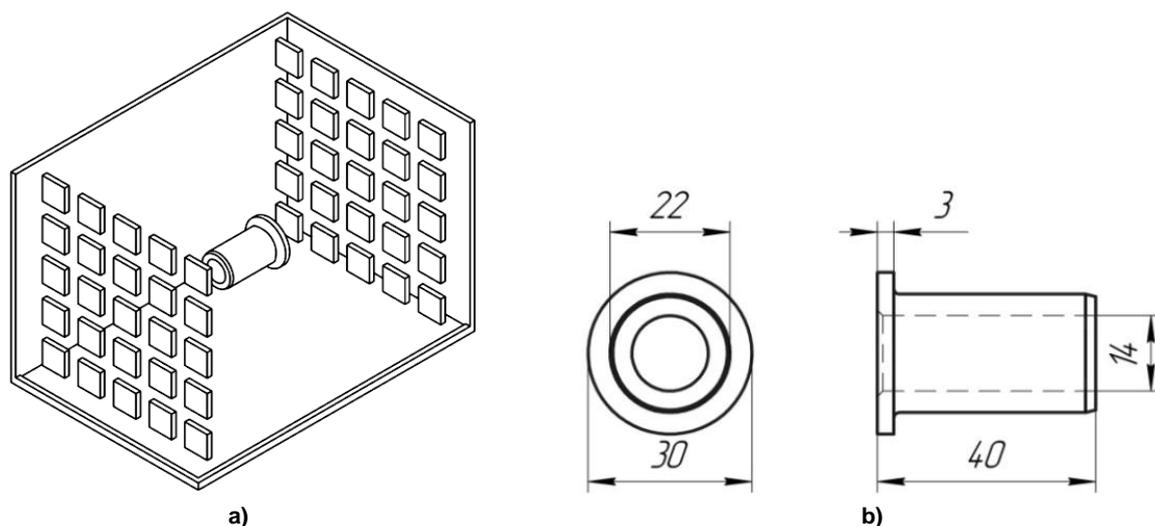


Рис. 2. Схематичное изображение гальванической ванны (а), геометрическая конфигурация и размеры катода (б)

Fig. 2. Schematic representation of the galvanic bath (a), geometric configuration and dimensions of the cathode (b)

Поиск оптимума производился в следующих диапазонах изменения значений параметров процесса: плотность тока – $45\text{--}55 \text{ А/дм}^2$; межэлектродное расстояние – $5\text{--}20 \text{ см}$.; интенсивность перемешивания электролита – $0,5\text{--}50 \text{ см/с}$.

Сравнение эффективности применения ГА и МРЧ для решения задачи оптимального управления процесса хромирования проводилось при размере начального набора решений, равном 15 для каждого метода.

ГА рассматривались в трех разных вариациях с использованием операций скрещивания, мутации и совместном применении обеих операций. Мутации хромосом решений производились с коэффициентом K_M , равным двум.

Эффективность каждого метода, безусловно, зависит от случайно сформированного начального набора решений, в связи с чем для получения наиболее объективных результатов и последующей оценки эффективности методов исследования проводились с одинаково заданным начальным набором решений.

Результаты поиска оптимума и количество итераций, потребовавшихся на поиск с использованием ГА и МРЧ, представлены в табл. 3.

Сравнительная характеристика методов оптимизации
Comparative characteristics of optimization methods

Таблица 3

Table 3

Метод поиска оптимума	Значение коэффициента равномерности	Количество итераций, потребовавшееся на поиск
ГА с использованием операции скрещивания	0,3506	4
ГА с использованием операции мутации	0,8361	10
ГА с использованием операций скрещивания и мутации	0,6711	5
МРЧ	0,8163	5

Как видно из приведенных в табл. 3 результатов исследования, наибольшее приближение к точке максимума коэффициента равномерности обеспечивается с использованием ГА, при этом МРЧ показал результат всего на 2,37 % ниже, что несущественно, учитывая количество точек расчета, которое потребовалось МРЧ для получения результата. Методу роя частиц потребовалось в два раза меньше количества итераций для определения экстремума.

Распределение точек поиска для каждого из рассмотренных методов (ГА с использованием операции скрещивания (а), с использованием операции мутации (б), с использованием операций скрещивания и мутации (с), метод роя частиц (д)) представлено на рис. 3.

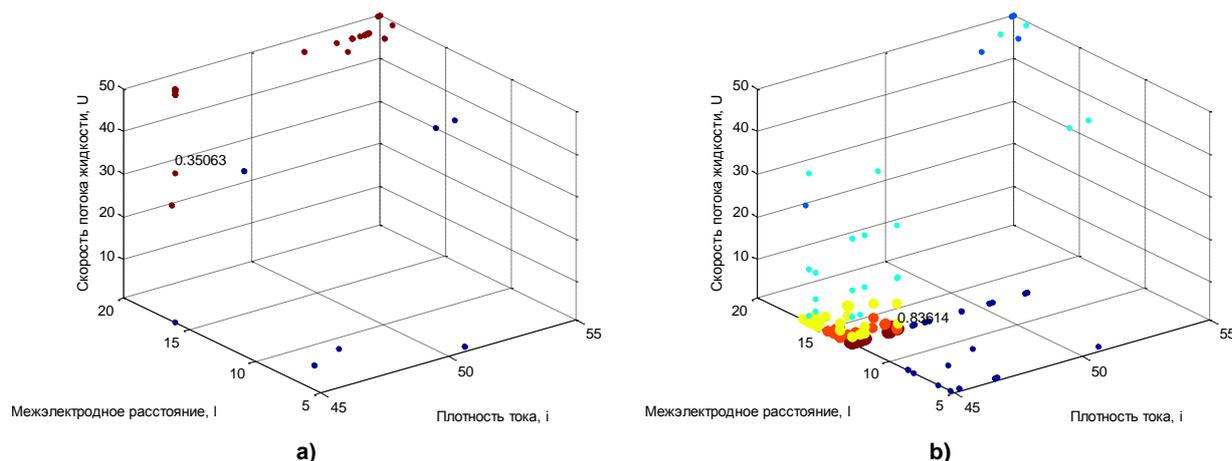


Рис. 3. Распределение точек поиска для ГА с использованием операции скрещивания (а), с использованием операции мутации (б), с использованием операций скрещивания и мутации (с), метод роя частиц (д) (см. также с. 37)

Fig. 3. Distribution of search points for genetic algorithms using the crossing operation (a), using the mutation operation (b), using the crossing and mutation operations (c), the particle swarm method (d) (see also p. 37)

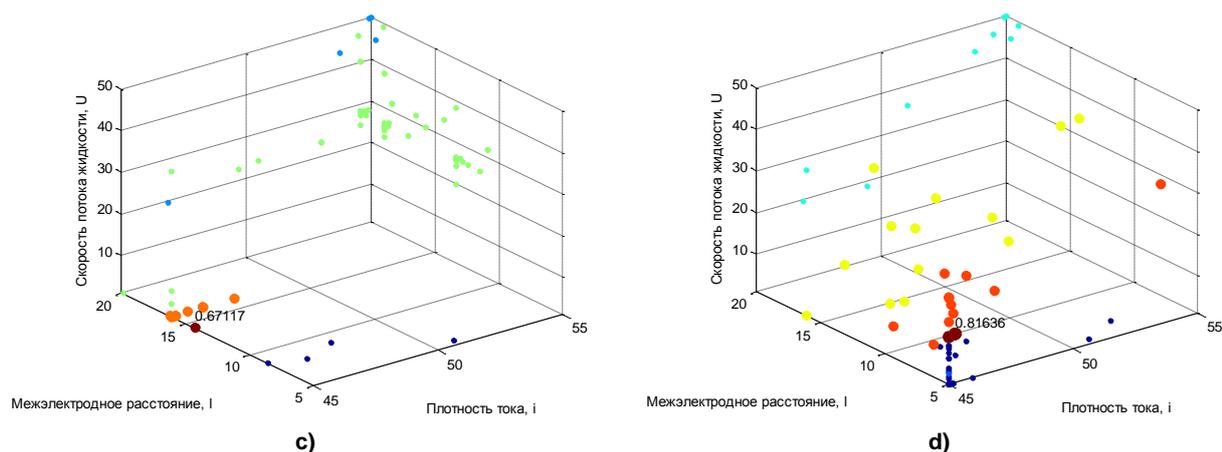


Рис. 3. Окончание
Fig. 3. End

6. Обсуждение результатов

Эффективность ГА, применительно к решению задачи многопараметрической оптимизации процесса нанесения ГП зависит от факта использования операций скрещивания и мутации. Применение операции скрещивания в ГА показало низкую эффективность ввиду того, что данная операция увеличивает разброс точек поиска, вследствие чего увеличивается вероятность попадания в точку локального экстремума.

Применение операции мутации вносит большее разнообразие в набор решений, благодаря чему позволяет вести поиск из точки локального оптимума, но это приводит к увеличению количества итераций, требуемых для определения наилучшего решения. Исключительное применение операции мутации в ГА позволяет получить наилучшее приближение к точке экстремума, однако данный метод требует большего числа итераций, соответственно вычислительных ресурсов и времени на поиск оптимального решения.

Применение МРЧ позволяет получить результат поиска экстремума коэффициента равномерности несущественно ниже, но благодаря планомерному продвижению поиска к экстремуму требуется меньшее количество итераций.

Заключение

Таким образом, применение эволюционных алгоритмов, таких как ГА и МРЧ, при оптимизации процессов нанесения ГП является целесообразным подходом к поиску его оптимальных параметров, обеспечивающих равномерность покрытия и эффективность процесса. Помимо этого, данные методы могут показать большую эффективность за счет дополнительной их настройки (выбора размера набора решений, подбора коэффициентов интенсивности мутации для ГА и постоянных ускорений для МРЧ).

В целом решение многопараметрической оптимизационной задачи управления процессом нанесения ГП с применением эволюционных и роевых методов позволяют сократить затраты на проведение экспериментов, улучшить эффективность процесса управления нанесением ГП, повысить его качественные показатели.

Список литературы

1. Соловьев Д.С., Потлов А.Ю., Литовка Ю.В. Снижение неравномерности толщины гальванического покрытия, наносимого с циклическим включением анодных секций // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 78–84.
2. Автоматизированная система управления гальваническими процессами при реверсировании тока с отключаемыми анодными секциями / В.В. Конкина, Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка, И.А. Мукина // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 67–77.
3. Соловьев Д.С., Мукина И.А., Литовка Ю.В. Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 9. С. 631–636. DOI: 10.17587/mau.18.631-636

4. Литовка Ю.В., Кондрашин Р.С. Моделирование и оптимизация импульсных токовых режимов нанесения гальванических покрытий // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 1999. Т. 5, № 1. С. 26.
5. Литовка Ю.В., Романенко А.В., Афанасьев А.В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 32, № 3. С. 301–304.
6. Пат. 6027631 США. Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer / E.K. Broadbent. Опубл. 22.02.2000.
7. Литовка Ю.В., Тарураев В.А. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. 1997. Т. 1, вып. 2. С. 41–48.
8. Литовка Ю.В., Као В.З., Соловьев Д.С. Оптимальное управление гальванической ванной с дополнительными катодами и биполярными электродами // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 1 (83). С. 26–28.
9. Пчелинцева И.Ю., Литовка Ю.В. Математическая модель и численная схема расчёта электрических полей в гальванических ваннах с плоским токонепроводящим экраном // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2021. № 3. С. 85–97.
10. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Многомерная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 2 (72). С. 34–39.
11. Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами / А.Г. Лютов, А.Р. Ишкулова // Мехатроника, автоматизация и управление - 2017. - Т. 19, № 3. – С. 185–191. DOI: 10.17587/mau.18.185-191
12. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 45–48.
13. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Оптимизация управления процессом нанесения гальванического покрытия в ваннах с многосекционными анодами с использованием генетических алгоритмов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 1. С. 103–111. DOI: 10.14529/ctcr170111
14. Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 3. С. 256–274.
15. Казакова Е.М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 39, № 2. С. 150–174. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174

References

1. Solov'ev D.S., Potlov A.Yu., Litovka Yu.V. [Reducing the unevenness of the thickness of the galvanic coating applied with cyclic inclusion of the anode sections]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2016;8:78–84. (In Russ.)
2. Konkina V.V., Solov'ev D.S., Litovka Yu.V., Mukina I.A. Automated control system of galvanic processes during reversing of current with the disconnected anodic sections. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Engineering & automation problems*. 2016;2:67–77. (In Russ.)
3. Solovjev D.S., Mukina I.A., Litovka Yu.V. Specific features of the optimal control of the electroplating processes in a multianode bath with different amperage values. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017;18(9):631–636. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.18.631-636
4. Litovka Yu.V., Kondrashin R.S. [Modeling and optimization of pulsed current modes of electroplating]. *Transactions of the Tambov state technical university*. 1999;5(1):26. (In Russ.)
5. Litovka Yu.V., Romanenko A.V., Afanas'ev A.V. [Modeling and optimization of the electroplating process under current reversal conditions]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 1998;32(3):301–304. (In Russ.)
6. Broadbent E.K. *Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer*. Patent USA, no. 6027631, 22.02.2000.
7. Litovka Yu.V., Taruraev V.A. [Optimization of a galvanic bath with movable anodes]. *Izvestiya Tula State University. Series: Computer engineering. Automation. Management*. 1997;1(2):41–48. (In Russ.)

8. Litovka Yu.V., Kao V.Z., Solov'ev D.S. [Optimal control of the galvanic bath with additional cathodes and bipolar electrodes]. *Mathematical methods in engineering and technology*. 2016;1(83):26–28. (In Russ.)
9. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. Mathematical model and numerical scheme for calculation of electric fields in galvanic baths with non-conductive screen. *Differential Equations and Control Processes*. 2021;(3):85–97. (In Russ.)
10. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes. *Vestnik UGATU*. 2016;20(2(72)):34–39. (In Russ.)
11. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017;19(3):185–191. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.18.185-191
12. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes. *Vestnik UGATU*. 2015;19(4(70)):45–48. (In Russ.)
13. Lutov A.G., Ishkulova A.R. Optimization of Control of Plating Process in Bath with Multi-section Anodes with Use of Genetic Algorithms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2017;17(1):103–111. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170111
14. Zakharova E.M., Minashina I.K. Review of multidimensional optimization techniques. *Information Processes*. 2014;14(3):256–274. (In Russ.)
15. Kazakova E.M. A Concise Overview of Particle Swarm Optimization Methods. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2022;39(2):150–174. (In Russ.) DOI: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174

Информация об авторах

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; lutov1@mail.ru.

Ишкулова Алия Рифовна, канд. техн. наук, доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; aliya.ishkulova@yandex.ru.

Information about the authors

Alexey G. Lutov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; lutov1@mail.ru.

Aliya R. Ishkulova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; aliya.ishkulova@yandex.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 07.12.2023

The article was submitted 07.12.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО БУРА В СОСТАВЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТА НА НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

С.Г. Некрасов¹, nekrasovsg@susu.ru
С.В. Перминов², info@medpribor.net
Е.В. Гусев¹, gusevev@susu.ru
В.Л. Кодкин¹, kodkinvl@susu.ru
А.И. Телегин³, teleginai@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Медприбор», Челябинск, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,
Миасс, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические вопросы разработки ультразвукового бура для проведения бурения грунта на небесных телах в составе роботизированной платформы и формулируются задачи ее управления. Специфика применения бура предполагает широкий диапазон температур при эксплуатации, малое потребление энергии, эффективный рабочий цикл и требование обеспечения сохранности структуры и состава грунта при воздействии на него инструмента. Одним из перспективных направлений разработки являются устройства с вибрационной развязкой от грунта по ультразвуку за счет трансформации ультразвуковых колебаний в повторяющиеся удары звуковой частоты с помощью специально введенного «свободного» тела между ультразвуковой и ударной частью бура (бит). Это позволяет проводить непрерывное бурение независимо от состояния ударного бита, включая его заклинивание. **Цель работы** состоит в выборе наиболее эффективной конструкции бура и составлении математической модели, обеспечивающей проведение имитационного моделирования. **Материалы и методы.** Рассмотрены технические решения как отечественных, так и зарубежных авторов, выбран прототип. Проанализированы теоретические работы и обнаружено, что изложенные в них материалы не содержат развернутых математических моделей, необходимых для имитационного моделирования на стадии проектирования и оптимизации конструкции. В теоретической части статьи предлагаются математические модели, полученные на основе эквивалентных параметров, найденных из распределенного описания элементов конструкции бура. Используются методы математической физики, классической механики и теории подобия. **Результаты заключаются** в том, что разработаны две альтернативные математические модели. Одна из моделей имеет непрерывное описание с существенно нелинейной жесткостью «стенки» при ударе, при этом ударное движение рассматривается как разновидность автоколебаний. Вторая модель основана на теории удара. **Заключение.** Проведено параметрическое исследование и получены зависимости частоты колебаний свободного тела от величины ударного зазора, массы тела и амплитуды колебаний концентратора и др. Рассмотренные модели могут быть использованы для имитационного моделирования при разработке конструкции бура. Сформулированы задачи управления роботизированной буровой платформой с позиции обеспечения работоспособности бура при бурении различных грунтов.

Ключевые слова: грунт, ультразвук, удар, бурение, пьезоэлектрический привод, трансформация колебаний, уравнения движения, автоколебания, имитационная модель, программный комплекс

Для цитирования: Моделирование ударного воздействия ультразвукового бура в составе роботизированной платформы для исследования грунта на небесных телах / С.Г. Некрасов, С.В. Перминов, Е.В. Гусев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 40–53. DOI: 10.14529/ctcr240304

Original article

DOI: 10.14529/ctcr240304

SIMULATION OF THE IMPACT OF AN ULTRASONIC DRILL AS A COMPOSITION OF A ROBOTIC PLATFORM FOR INVESTIGATION OF SOIL ON CELESTIAL BODIES

S.G. Nekrasov¹, nekrasovsg@susu.ru

S.V. Perminov², info@medpribor.net

E.V. Gusev¹, gusevev@susu.ru

V.L. Kodkin¹, kodkinvl@susu.ru

A.I. Telegin³, teleginai@susu.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia

³ South Ural State University, Miass, Russia

Abstract. The article discusses the theoretical issues of developing an ultrasonic drill for drilling soil on celestial bodies as part of a robotic platform and formulates the tasks of its control. The specifics of using the drill require a wide temperature range during operation, low energy consumption, an efficient operating cycle and the requirement to ensure the preservation of the structure and composition of the soil when exposed to the tool. One of the promising areas of development is devices with vibration decoupling from the ground by ultrasound due to the transformation of ultrasonic vibrations into repeated impacts of sound frequency using a specially introduced “free” body between the ultrasonic and impact parts of the drill (bit). This allows continuous drilling regardless of the condition of the impact bit, including jamming. **The purpose of the work** is to select the most effective drill design and compile a mathematical model that provides simulation modeling. **Materials and methods.** Technical solutions of both domestic and foreign authors were considered, and a prototype was selected. Theoretical works were analyzed and it was found that the materials presented in them do not contain detailed mathematical models necessary for simulation modeling at the stage of design and optimization of the structure. In the theoretical part of the article, mathematical models are proposed, obtained on the basis of equivalent parameters found from a distributed description of the drill design elements. Methods of mathematical physics, classical mechanics and similarity theory were used. **The results are** that two alternative mathematical models are developed. One of the models has a continuous description with a significantly nonlinear rigidity of the “wall” upon impact, while the impact motion is considered as a type of self-oscillation. The second model is based on the theory of impact. **Conclusion.** A parametric study was carried out and the dependences of the oscillation frequency of a free body on the size of the impact gap, body mass and amplitude of oscillations of the concentrator, etc. were obtained. The considered models can be used for simulation modeling when developing a drill design. The tasks of controlling a robotic drilling platform are formulated from the position of ensuring the operability of the drill when drilling various soils.

Keywords: soil, ultrasound, impact, drilling, piezoelectric drive, vibration transformation, equations of motion, self-oscillations, simulation model, software package

For citation: Nekrasov S.G., Perminov S.V., Gusev E.V., Kodkin V.L., Telegin A.I. Simulation of the impact of an ultrasonic drill as a composition of a robotic platform for investigation of soil on celestial bodies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):40–53. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240304

Введение

Отбор проб грунта, анализ на месте и, возможно, возвращение образцов на землю становятся все более важными в миссиях по исследованию планет, комет и других космических тел. Существующие способы бурения, пригодные для использования на небесных телах, обычно требуют значительных продольных усилий на бурильный инструмент, имеют сравнительно большое потребление мощности и не всегда эффективный рабочий цикл. Глубина бурения зависит от конструкции бура и может достигать 20 и более метров. Критическими являются требования к суточному перепаду температур (от -270 до $+500$ °C), что требует использования в устройствах специально разработанных материалов.

Устройство бура должно обеспечивать длительный период автономной работы с использованием солнечных батарей при разных видах грунта, причем грунт может быть представлен различным составом от гранита и базальта до льда в различных фазовых состояниях. Известные грунтозаборные устройства пробивного действия [1] – пенетраторы – можно использовать только один раз при их ускоренном падении на поверхность планеты, и, следовательно, они не пригодны для непрерывного исследования грунта.

Одним из вариантов обеспечения этих требований является использование ультразвуковых преобразователей с частичной или полной трансформацией вибрации в удары [2–7]. Эти устройства имеют вибрационную развязку от грунта по ультразвуку за счет трансформации ультразвуковых колебаний в повторяющиеся удары звуковой частоты с помощью специально введенного «свободного» тела между ультразвуковой и ударной частью бура (бит). Это позволяет проводить непрерывное бурение независимо от состояния ударного бита, включая даже его заклинивание. При надлежащем выборе материалов и конструкции КПД таких устройств может достигать 90 % и более в вышеуказанных диапазонах внешних условий.

Анализ литературных источников показывает, что за рубежом и в России имеются исследования [8–15], в которых приводятся результаты расчетов таких преобразователей с использованием различных программных комплексов, но, к сожалению, не приводятся математические модели, необходимые для имитационного моделирования на стадиях проектирования. Данная работа призвана частично устранить этот недостаток.

1. Анализ некоторых конструкторских решений

Вариант осуществления устройства, в котором частично устранены вышеуказанные недостатки, представлен в патенте от 2005 года [3]. Устройство реализует ультразвуковой (УЗ) принцип работы, который модифицирован ударом специального бита, взаимодействующего с введенным в конструкцию «свободным» телом, размещенным в «пучности» УЗ-колебаний буровой головки в конце волновода [3].

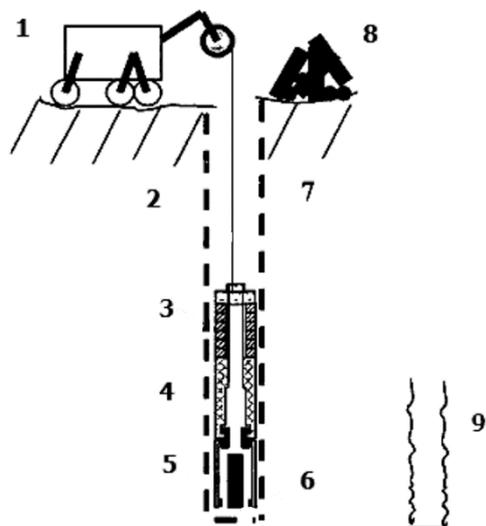


Рис. 1. Буровая установка
Fig. 1. Drilling rig

Для обеспечения большой глубины бурения использован принцип циклической работы грызуна в норке, когда он извлекает осыпавшийся грунт, разрывает и удерживает его и, наконец, извлекает и переворачивает этот «кern» на поверхности. Аналогично действует и устройство, которое состоит из силового привода и буровой головки. Блок питания расположен в стационарной части силового привода 1 (рис. 1) на поверхности 7 и генерирует колебания обычно частотой 5–25 кГц для активации механизма. Напряжение УЗ-частоты подается на пьезопривод посредством кабеля 2, который служит также для транспортировки грунта на поверхность. Заявляется, что какой-либо существенной продольной статической нагрузки (пригруза) здесь не требуется, однако при наличии некоторых видов сыпучих грунтов, например, слежавшегося песка, без пригруза не обойтись, о чем говорит отрицательный опыт эксплуатации марсохода InSight [16].

Буровая головка (см. рис. 1) состоит из пьезопривода, свободной массы и бурового бита. Привод состоит из пьезокерамического источника УЗ-вибрации 3 и волновода-концентратора рупорной конфигурации 4, который усиливает амплитуду вибрации в сторону бурового бита. Полость внутри волнового рупора обеспечивает также пространство для размещения датчиков, необходимых для автоматизации буровой платформы.

Ультразвуковой привод приводит в действие встроенное свободное тело (элемент 105 на рис. 2), и оно тем самым забивает бит, причем свободное тело работает как развязывающий по ультразвуку трансформатор, понижающий частоту УЗ-вибрации до звуковой частоты ударного действия.

Волновод-рупор приводится в действие на его резонансной частоте, а свободное тело отскакивает назад и вперед между ультразвуковым рупором и буровым битом в частотном диапазоне

от десятка до 1000 Гц [3]. Рупорная форма ударной части буровой головки защищает центральную часть керна от механического воздействия и сохраняет тем самым структуру и состав грунта.

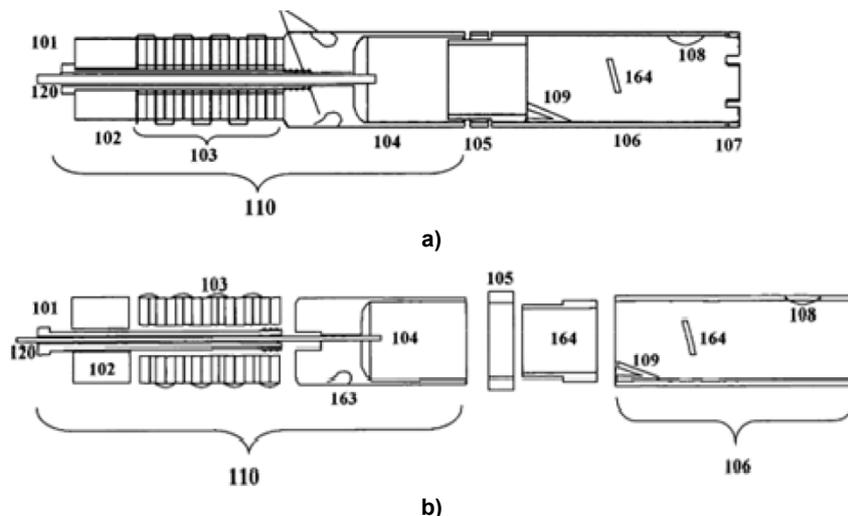


Рис. 2. Сборочный (а) и детализовочный (б) чертеж устройства в соответствии с описанием патента US 6968910 B2
Fig. 2. Assembly (a) and detail (b) drawing of the device in accordance with the description of the patent US 6968910 B2

Предложенное устройство способно выполнять глубокое бурение с низким предварительным натягом (пригруз) и малой мощностью, а также обладает высокой устойчивостью к перекоосу. Авторами патента было продемонстрировано, что устройство работает с различных роботизированных платформ, с помощью которых можно бурить такие твердые породы, как гранит и базальт, а также мягкие, как песчаник и туф.

Устройство обладает высокой устойчивостью к изменениям условий эксплуатации, поскольку оно приводится в действие пьезоэлектрической керамикой, которая может быть синтезирована для работы в широком диапазоне температур, включая те, которые существуют на Марсе и Венере. Подобное устройство бура было включено в состав марсохода Curiosity, который до недавнего времени успешно работал на Марсе.

Отсюда следует **первая (естественная) задача управления:** управление рабочим циклом буровой платформы.

Далее последовал ряд изобретений [4–7], например, патент US 7156189 B1 [4]. В России аналогичной проблемой занималось ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». Например, в патенте [7] описывается конструкция бура для забора образцов грунта без изменения его состава. Наиболее близким по технической сущности предлагаемому устройству является рассмотренное выше ультразвуковое грунтозаборное устройство по патенту [3], принятое авторами за прототип.

В устройство (рис. 3) включено свободное тело 5, прижимаемое пружиной 6 к тор-

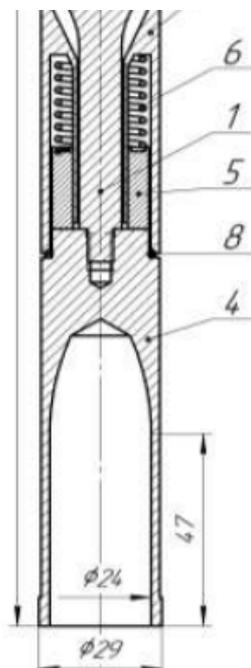


Рис. 3. Ультразвуковой концентратор рупорного типа с ударом по патенту RU 2503815: 1, 4 – составной ультразвуковой преобразователь-концентратор; 5 – свободное тело; 6 – пружина; 8 – виброуплотнение
Fig. 3. Horn-type ultrasonic concentrator with impact according to patent RU 2503815: 1, 4 – composite ultrasonic transducer-concentrator; 5 – free body; 6 – spring; 8 – vibration seal

цевой поверхности бурового инструмента 4. Испытания по предлагаемому патенту, по заявлению авторов, показали невысокую эффективность его работы [15].

Заявлено также, что осуществляется контроль скорости бурения, температуры пьезопривода и подстройка частоты генератора на резонансную частоту волновода, согласование выходного импеданса генератора с нагрузкой и другое. Не очень понятно, для чего нужно согласовывать рупорный преобразователь с нагрузкой, когда лучше рассогласовать его для обеспечения максимальных амплитуд движения бита в узкой полосе грунта и тем самым обеспечить сохранность добываемых образцов. Кроме того, для повышения эффективности конструкция ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» должна обеспечивать развязку устройства с грунтом по ультразвуку, как это сделано, например, в патенте [4].

Во всех рассмотренных устройствах не учитываются резонансные свойства грунта, которые определяются размерами его частиц. Известно, например, что при устройстве дорог [17] с помощью виброплит используют частоты примерно 30 Гц, что возбуждает резонансные колебания частиц грунта диаметром около 40 мм, при этом окружающие их мелкие и крупные частицы мало перемещаются. Исправить ситуацию позволяет удар, который реализуется при воздействии виброплиты о грунт в сочетании со статическим пригрузом. Практикуется также использование кратных частот (60 и 90 Гц), что обеспечивает подвижность частиц размером уже 10–20 мм. Отсутствие учета этого параметра при бурении на Марсе могло привести к неудаче марсохода InSight [16]. Однако надо учитывать, что монолитный грунт (базальт, гранит, лед) имеет высокие собственные частоты, поэтому основным бурильным фактором будет оставаться удар, обладающий широкой спектральной характеристикой.

Вторая задача управления роботизированной системы: управление частотой ударов свободного тела до достижения резонанса доминирующих частиц исследуемого грунта. В результате возникает добавочная подвижность частиц и ускоренное проникновение бура в грунт (песчаный, гравийно-песчаный и подобные), скорость которого должна регистрироваться датчиком, на основе показаний которого и строится данный вид управления посредством влияющих величин.

2. Модель на основе эквивалентных параметров

Отметим, что эквивалентные параметры использовались в работе [8], однако выбор эквивалентных параметров и математическая модель не приводится.

Эквивалентные параметры этой модели могут быть получены из условия равенства полной энергии эквивалентной и реальной системы. Например, для определения эквивалентной массы концентратора, приведенной к его выходной грани, можно использовать условие равенства максимальной кинетической энергии эквивалентного и реального концентраторов в месте приведения на выбранной частоте. Необходимо численно или экспериментально найти частоту и форму собственных колебаний, что дает возможность интегрированием найти кинетическую энергию для выбранной формы колебаний:

$$W_{\max} = 0,5\rho\pi\Omega_k^2 \int_0^L y_n(x)_k^2 R(x)^2 dx, \quad (1)$$

где $y_n(x)$ – распределение нормированных амплитуд с выбранной формой и частотой Ω_k колебаний; $R(x)$ – профиль концентратора; x – продольная координата; L – учитываемая длина концентратора. Условие равенства кинетических энергий позволяет найти эквивалентную массу концентратора M_k для k -й формы колебаний:

$$M_k = 2W_{\max} / \left[\Omega_k^2 y_n(L)_k^2 \right]. \quad (2)$$

Эквивалентный коэффициент демпфирования $\alpha = R_k / (2M_k\Omega_k^2)$ можно найти только экспериментально, например, методом квадрантных частот [18].

Отдельным вопросом стоит определение характера взаимодействия тел при ударе. К настоящему времени можно считать, что это взаимодействие достаточно изучено и большой вклад внесли работы Герца, Сен-Венана, Бусинеска, Гюгонио, Себерта и др. [19]. Принято полагать, что в месте удара действует контактная и волновая жесткость и реализуется два вида деформации сжатия – это упругие деформации со скоростью удара и «звуковые» деформации со скоростью звука («классический и волновой» подход) [20]. В классическом подходе вводится коэффициент вос-

становления как коэффициент потери импульса при ударе, который определяется обычно экспериментально, а в волновой теории существуют только волновые процессы и их комбинация.

На рис. 4 представлены графики зависимостей перемещений, полученные нами в вычислительной среде Simulation SW, характерных узлов вдоль продольной оси экспоненциального концентратора от времени (аналогичная картина и у рупорного концентратора с экспоненциальным профилем) при ударе по рабочему концу концентратора. Интересующий нас узел номер 13250 (кривая 5) находится в пучности колебаний на рабочем конце концентратора с наименьшим диаметром, в который наносится удар телом массой 2 г, и далее эта масса в расчетах продолжает находиться в составе концентратора. При ударе тело движется вместе с рабочим концом концентратора, вызывая его деформацию, с начальной скоростью, равной скорости тела в момент удара. Численное решение волнового уравнения дает нам траекторию движения этого тела по кривой 5 до точки 1, когда скорость перемещения уменьшается до нуля, при этом тело в интервале между точками 1 и 2 сохраняет набранную скорость, отрывается и движется далее по инерции до следующего удара уже с битом. Время от удара до отрыва свободного тела составляет величину $\sim 10^{-5}$ с (см. рис. 4), а средний период соударений величину $\sim 10^{-2}$ с [8], и можно считать, что время удара мало и им можно пренебречь (как и действием медленных и статических сил).

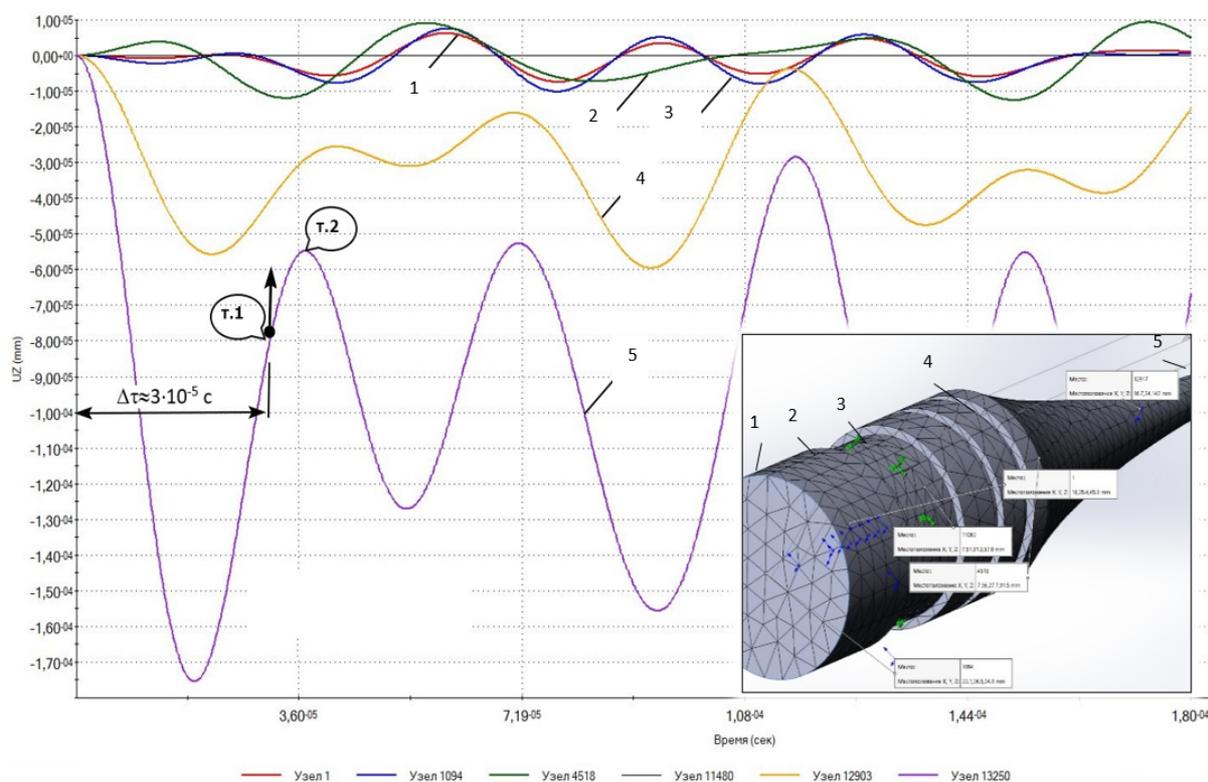


Рис. 4. Траектории движения различных узлов конечно-элементной сетки: 1 – пассивный конец УЗ-преобразователя (узел 1); 2, 3, 4 – промежуточные узлы; 5 – активный конец УЗ-преобразователя (узел 13250)

Fig. 4. Motion trajectories of various nodes of a finite element mesh: 1 – passive end of the ultrasonic transducer (node 1); 2, 3, 4 – intermediate nodes; 5 – active end of the ultrasonic transducer (node 13250)

Учитывая большое отличие времени контакта при ударе и среднего периода повторения ударов, можно определить **третью задачу управления**: минимизировать энергопотребление за счет выключения питания на ультразвуковой преобразователь сразу после удара/ударов о рабочую поверхность преобразователя и предварительного включения его не более чем за четверть периода движения свободного тела.

3. Две модели работы бура в квазиустановившемся режиме работы

Модифицируем теперь схему взаимодействия элементов конструкции по патенту RU 2503815 для повышения ее эффективности: параллельное соединение ультразвуковой и ударной части бура преобразуем в их последовательное соединение, как показано на рис. 5.

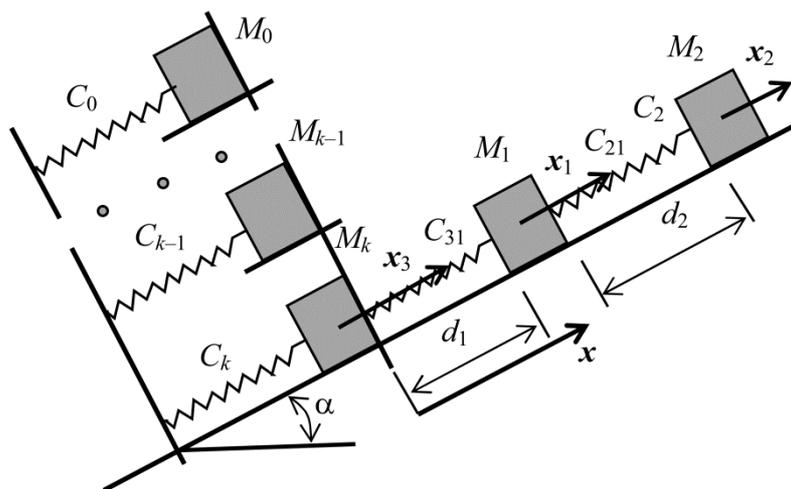


Рис. 5. Эквивалентная модель бура с последовательным соединением элементов
Fig. 5. Equivalent model of a drill with a series connection of elements

На рис. 5 изображена модель последовательного взаимодействия эквивалентных тел модели M_1 , M_2 и M_k (трехмассовая модель), пружины жесткостью C_2 , расположенных на наклонной шероховатой плоскости под углом α к горизонту. На рис. 5 также отражены модельные жесткости C_{21} и C_{31} , необходимые для реализации непрерывной модели устройства (не путать с жесткостью пружины C_2). Из места, расположенного на расстоянии d_1 , под действием веса и пружины начинает соскальзывать тело M_1 и затем сталкивается с телом распределенной массы (концентратор), вибрирующим на некоторой резонансной частоте f_k с парциальной массой M_k и жесткостью C_k .

При ударе с достаточно широкополосной спектральной характеристикой могут одновременно возбуждаться колебания на собственных частотах Ω_k и других, а статическая масса концентратора M_0 удерживается пружиной с жесткостью C_0 , являющейся элементом виброразвязки концентратора с корпусом. С другой стороны концентратора тело M_1 взаимодействует с битом M_2 посредством пружины C_2 (или без нее), при этом бит поступательно перемещается в грунт при ударах тела массы M_1 .

Особенность задачи заключается в том, что реальные свойства грунта неизвестны, поэтому в инженерной практике в этом случае рассматривают два крайних режима работы – режимы холостого хода и короткого замыкания, при этом реальная нагрузка на бур в этом случае меняется от нуля (вакуум или газ) до бесконечности (полное заклинивание). К счастью, разработчик должен стремиться реализовать именно режим короткого замыкания или близкий к нему, что означает фактическое рассогласование бура с нагрузкой за счет уменьшения площади контакта с грунтом и тем самым минимальное потребление им энергии, при этом происходит бережное воздействие бита на грунт во время работы, что и обеспечивает сохранность проб грунта. Итак, будем рассматривать уравнения движения тел модели в режиме короткого замыкания.

3.1. Непрерывная модель

Рассмотрим движение такой системы тел в установившемся режиме. Ниже представлена первая разработанная модель, которая представлена непрерывной системой уравнений динамики трехмассовой системы тел (см. рис. 5), в которой удар определяется с помощью введения в уравнения нелинейной жесткости, величина которой резко возрастает при контакте тел, когда $x_1 + d_1 + x_3 \rightarrow 0$ (с учетом принятого положительного направления перемещений) или $x_1 - d_2 + x_2 \rightarrow 0$. Нелинейные жесткости $C_{21} = C_2 + b_2 / (x_1 + x_2 - d_2)_2^n$ и $C_{31} = b_1 / (x_1 + d_1 + x_3)_1^n$ стремятся к бесконечности при контакте с телом M_1 , что и является эквивалентом контактной жесткости упругих тел при ударе. Здесь принято, что x_1 , x_2 и x_3 – перемещения тел M_1 , M_2 и M_k , определяемые относительно их положения равновесия $\underline{x}_1 = d_1$, $\underline{x}_2 = d_1 + d_2$ и $\underline{x}_3 = 0$, а степени знаменателей n_2 и n_1 являются параметрами аппроксимации модели.

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + [C_2 + b_2 / (x_1 + x_2 + d_2)^{n_2}] (x_1 - x_2) + [b_1 / (x_1 + d_1 + x_3)^{n_1}] (x_1 - x_3) &= 0; \\ M_2 \ddot{x}_2 - [C_2 + (b_2 / (x_1 + x_2 + d_2)^{n_2})] (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_k \ddot{x}_3 + R_k \dot{x}_3 + C_k x_3 - [b_1 / (x_3 + x_1 + d_1)^{n_1}] (x_1 - x_3) &= F_m \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} x_1(0) = -d_1, x_2(0) = d_1 + d_2, x_3(0) = 0; \\ \dot{x}_1(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0, \dot{x}_3(0) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем в рассмотрение следующие безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} \Omega_0 = \sqrt{C_k / M_k}, \tau = \Omega_0 t, \eta = \omega / \Omega_0, h_0 = F_m / M_k \Omega_0^2; \\ w_1 = x_1 / h_0, w_2 = x_2 / h_0, w_3 = x_3 / h_0. \end{aligned} \quad (5)$$

С использованием этих параметров система уравнений (3) примет безразмерный вид:

$$\begin{aligned} \ddot{w}_1 + \frac{\Omega_1^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) + \left(\frac{b_2 h_0^{1-n_2}}{e_1 F_0} \right) \left(\frac{w_1 - w_2}{(w_2 + w_1 + d_2 / h_0)^{n_2}} \right) + \left(\frac{b_1 h_0^{1-n_1}}{e_1 F_0} \right) \left(\frac{w_1 - w_3}{(w_3 + w_1 + d_1 / h_0)^{n_1}} \right) &= 0; \\ \ddot{w}_2 - \frac{\Omega_2^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) - \left(\frac{b_2 h_0^{1-n_2}}{e_2 F_0} \right) \left(\frac{w_1 - w_2}{(w_2 + w_1 + d_2 / h_0)^{n_2}} \right) &= 0; \\ \ddot{w}_3 + 2\alpha \dot{w}_3 + w_3 - \left(\frac{b_1 h_0^{1-n_1}}{F_0} \right) \left(\frac{w_1 - w_3}{(w_3 + w_1 + d_1 / h_0)^{n_1}} \right) &= \frac{F_m}{F_0} \cos \eta \tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$F_0 = M_k h_0 \Omega_0^2; \alpha = \frac{R_k}{2M_k \Omega_0}; \Omega_1 = \sqrt{\frac{C_2}{M_1}}; \Omega_2 = \sqrt{\frac{C_2}{M_2}}; e_2 = \frac{M_k}{M_2}; e_1 = \frac{M_k}{M_1}. \quad (7)$$

Коэффициенты модельных жесткостей b_1 и b_2 должны учитывать характер нелинейности и иметь соответствующую размерность. В уравнениях также пренебрегаем трением при вертикальном бурении (невесомость) тела M_1 в установившемся режиме, так как, во-первых, его стараются избежать конструктивным путем, выбирая сравнительно большие боковые зазоры, и, во-вторых, остаточное трение обычно самоустраняется после приработки ударного механизма, а если после этого трение вновь появляется, то это свидетельствует об аварийной работе.

3.2. Дискретная модель

Вторая модель является, по сути, дискретной и основана на известных результатах теории удара [19, 20], при этом уравнения движения тел в интервале времени между ударами имеют вид:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + C_2 (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_2 \ddot{x}_2 - C_2 (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_k \ddot{x}_3 + k_k \dot{x}_3 + C_k x_3 &= F_m \cos \omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

Приведем уравнения к безразмерному виду, используя уже введенные безразмерные параметры (5) и (7):

$$\begin{aligned} \ddot{w}_1 + \frac{\Omega_1^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) &= 0; \\ \ddot{w}_2 - \frac{\Omega_2^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) &= 0; \\ \ddot{w}_3 + 2\alpha \dot{w}_3 + w_3 &= \frac{F_m}{F_0} \cos \eta \tau. \end{aligned} \quad (9)$$

Задача замыкается применением условий ударного сопряжения тел. Используя безразмерные величины, запишем выражение коэффициента восстановления [21] при ударе тел M_1 и M_2 :

$$k_1 = -(-\dot{w}'_1 - \dot{w}'_2) / (\dot{w}_1 + \dot{w}_2), \quad (10)$$

где точка и символ штрих над обозначением переменной определяют соответствующее значение скорости после удара. Применим теперь закон сохранения количества движения при упругом ударе:

$$\dot{w}_1 + \frac{e_1}{e_2} \dot{w}_2 = \dot{w}'_1 + \frac{e_1}{e_2} \dot{w}'_2 \quad / \quad (w_1 - d_2 / h_0) + w_2 = 0, \quad (11)$$

и, аналогично, при ударе тел M_1 и M_k :

$$k_2 = -(-\dot{w}'_1 - \dot{w}'_3) / (\dot{w}_1 + \dot{w}_3); \quad (12)$$

$$\dot{w}_1 + \frac{e_2}{e_1} \dot{w}_3 = \dot{w}'_1 + \frac{e_2}{e_1} \dot{w}'_3 \quad / \quad (w_1 + d_1 / h_0) + w_3 = 0. \quad (13)$$

Соотношения (11) и (13) выполняются при выполнении условий контакта, которые записаны здесь через слэш, и служат для определения начальных значений перемещения и скорости, необходимых в качестве начальных условий для уравнений движения (9).

Описание программы для расчета ударов свободного тела

Для расчёта траектории движения свободного тела M_1 были созданы имитационные модели в среде имитационного математического моделирования Simulink. Первая система уравнений сведена к форме Коши и решается методом Рунге – Кутты четвертого порядка с переменным шагом по времени (ode45). Возможно аналитическое построение решения подобно работам [22–24], при этом ударное движение свободного тела нужно рассматривать как разновидность автоколебаний. Вторая модель также реализована в системе Simulink и требует введения дискретного времени для выявления моментов контакта. Подробное описание решения на основе первой и второй модели выходит за рамки данной статьи.

Рассмотрим лишь некоторые особенности и результаты расчетов на основе уравнений (8)–(13). Одновременно рассматривается движение свободного тела, бита и концентратора. Имитационная модель задачи представлена в виде схемы на рис. 6. Видим, что, в случае совпадения перемещений взаимодействующих тел, вычисляются значения послеударных скоростей, которые совместно используются в качестве новых начальных условий. Расчет значений перемещения и скорости ударных тел условно разбит на две взаимосвязанные части: блок расчета значений перемещения и скорости концентратора и свободного тела и блок расчета значений перемещения и скорости свободного тела и бита на каждом временном шаге. Вычисление начальных условий происходит только для соударяющихся тел и вводится в программу расчета при определенном сочетании логических переменных (см. рис. 6).

Удар считаем упругим с коэффициентом восстановления 0,9. Собственная масса бита M_2 примерно равна парциальной массе концентратора на частоте ω_k и составляет 50 г. На рис. 7 представлены временные зависимости перемещения и скорости свободного тела вблизи рабочей поверхности концентратора (без удара по биту) при вышеуказанных параметрах модели. Наблюдается неравномерное распределение амплитуд перемещений от времени, что свидетельствует, по сути, о случайном характере столкновений рабочей поверхности концентратора и свободного тела, при этом диапазон колебаний свободного тела лежит в пределах от 1 до 3 мм, а частота колебаний составляет примерно 580 Гц.

Эта неравномерность связана с несинхронностью и несинфазностью движения этих тел, что существенно снижает эффективность работы бура. Такая проблема может быть решена с помощью определенных средств настройки.

Отсюда следует **четвертая задача управления**: обеспечение кратности частоты ультразвука и частоты колебаний свободного тела.

На рис. 8 показано влияние параметров модели на частоту f_1 и амплитуду колебаний свободной массы x_1 ; очевидно, что для параметров модели, указанных выше, велика роль пружины и поведение свободной массы соответствует типичному поведению одномассовой колебательной

системы. Отсутствие жесткости C_2 приводит к ударному взаимодействию всех тел при определенном наборе параметров, например, указанных на рис. 8. Видим, что уменьшение зазора и увеличение амплитуды колебаний концентратора x_{30} приводит к существенному увеличению частоты колебаний свободного тела, при этом надо учитывать случайный характер ударных взаимодействий, поэтому результат является средним по достаточно длинной выборке. Полученная модель является, по сути, имитационной и обладает присущими им недостатками, включая невозможность получения обобщающих результатов при ограниченном числе вычислений, однако это хороший инструмент для разработки и оптимизации устройства.

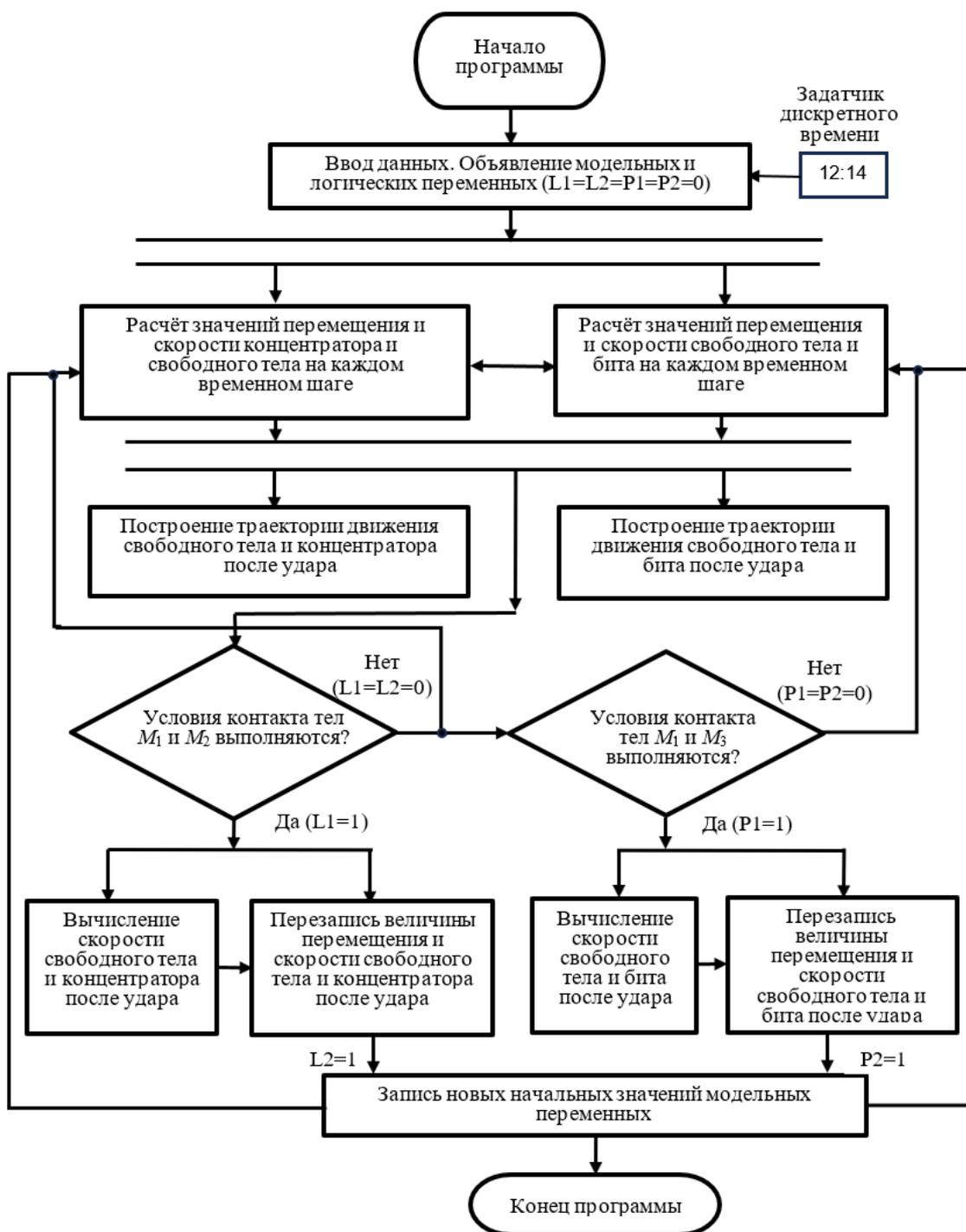


Рис. 6. Укрупненная структурная схема программы для расчета траектории движения ударных тел
Fig. 6. Enlarged block diagram of the program for calculating the trajectory of impact bodies

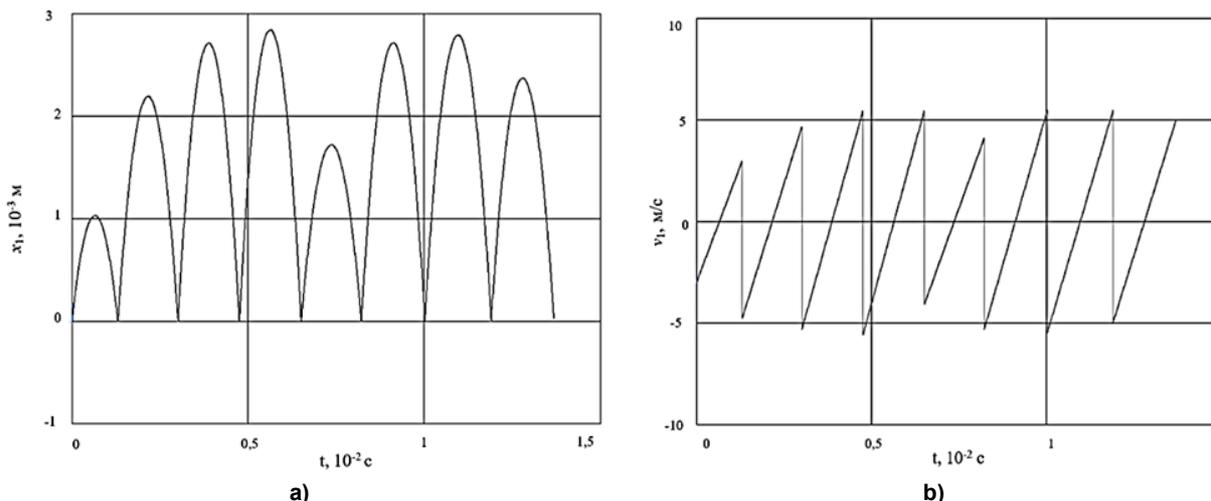


Рис. 7. Перемещение (а) и скорость (б) свободного тела с массой 4 г
Fig. 7. Displacement (a) and velocity (b) of a free body with a mass of 4 g

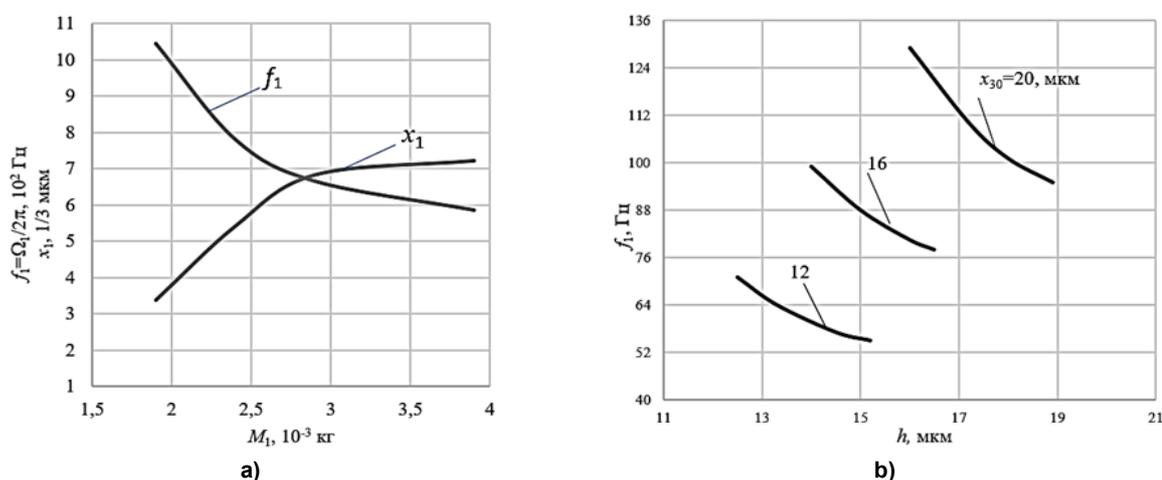


Рис. 8. Зависимости частоты и амплитуды свободного тела (а) от его массы и частоты от ударного зазора при разных амплитудах УЗ-колебаний (б)
Fig. 8. Dependences of the frequency and amplitude of a free body (a) on its mass and frequency on the impact gap at different amplitudes of ultrasonic vibrations (b)

Выводы

В результате выполненных исследований удалось выявить конструкцию бура с развязкой от грунта по ультразвуку, что обеспечивает работоспособность бура даже при заклинивании ударного бита в грунте. Данная конструкция представлена в виде схемы замещения с последовательным соединением элементов с эквивалентными параметрами, полученными из распределенного описания конструкции бура. Рассмотрены непрерывная и дискретная трехмассовая математическая модель бура, описана работа программы расчета движения свободного тела, выполнено параметрическое исследование на основе этой модели.

Одним из основных результатов работы является формулировка задач управления работой буровой роботизированной платформы:

- первая (естественная) задача: управление рабочим циклом буровой платформы;
- вторая задача: управление частотой ударов свободного тела до достижения резонанса доминирующих частиц исследуемого грунта;
- третья задача: минимизация энергопотребления за счет выключения питания на ультразвуковой преобразователь сразу после удара/ударов о рабочую поверхность преобразователя и предварительного включения его не более чем за четверть периода движения свободного тела;
- четвертая задача управления: обеспечение и поддержание кратности отношения частоты ультразвука к частоте колебаний свободного тела.

Список литературы

1. Патент RU 2111900. Пенетратор для исследования поверхности небесных тел / Ю.П. Акулов, 1998.
2. Pat. US 6863136 B2. Smart Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (SUSDC) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin, X. Bao, 2005.
3. Pat. US 6968910 B2. Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin, X. Bao, 2005.
4. Pat. US 7156189 B1. Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, 2007.
5. Pat. US 8640786 B2. Percussive augments of rotary drills for operating as a rotary-hammer drill / J.B. Aldrich, Y. Bar-Cohen et al., 2014.
6. Патент RU 2598947. Ультразвуковой бур / Д.В. Генне, В.И. Костенко, И.Г. Митрофанов и др., 2016.
7. Патент RU 2503815. Ультразвуковое грунтозаборное устройство / Д.В. Генне, В.И. Костенко, И.Г. Митрофанов и др., 2018.
8. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) / X. Bao, Y. Bar-Cohen, Z. Chang, S. Sherrit // IEEE Transactions of Ultrasonics, Sonics and Frequency Control. 2003. Vol. 50 (9). P. 1147–1160. DOI: 10.1109/tuffc.2003.1235326
9. Subsurface sampler and sensors platform using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, X. Bao, M. Badescu // Paper 6529–18, Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium. San Diego, CA, March 19–22, 2007. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.715048
10. Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin et al. // Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems. 2001. Vol. 4327. P. 441–449. DOI: 10.1117/12.436556
11. Design and analysis of ultrasonic actuator in consideration of length-reduction for a USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer) / Z. Chang, S. Sherrit, M. Badescu et al. // Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference. 2005. Vol. 5762 (10). P. 563–571. DOI: 10.1117/12.598851
12. Sherrit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. Vol. 1. P. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482
13. Harkness P., Lucas M., Cardoni A. Maximization of the Effective Impulse Delivered by a High-Frequency/Low-Frequency Planetary Drill Tool // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2011. Vol. 58, no. 11. P. 2387–2396. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.2096
14. Повышение эффективности работы ультразвуковой вибрационной системы для кавитационной обработки жидкости / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, С.Н. Циганок // Международная конференция и семинар по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам EDM 2018. Новосибирск: НГТУ, 2018. С. 287–291.
15. Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Генне Д.В. Разработка ультразвуковой колебательной системы для бурения лунного грунта // 20 Международная конференция-семинар молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM 2019. Новосибирск: НГТУ, 2019. С. 174–186.
16. Ганиев Р. Марсоход InSight перестал бурить скважину на Марсе. Что произошло? URL: <https://hi-news.ru/technology/marsohod-insight-perestal-burit-skvazhinu-na-marse-cto-proizoshlo.html> (дата обращения: 04.04.2024).
17. Некрасов С.Г., Перминов С.В. Модель вибратора для проектирования вибромашин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2021. Т. 21, № 4. С. 15–25. DOI: 10.14529/engin210402
18. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи: пер. с англ. / под ред. Е. Кикучи. М.: Мир, 1972. 424 с.
19. Прочность. Устойчивость. Колебания: справ.: в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 821 с.
20. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 224 с.
21. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «Наукоедение», 2013. № 5. С. 1–15. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (дата обращения: 04.04.2024).
22. Некрасов С.Г. Измерение количества растворенного газа в жидкости на основе резонанс-

ных характеристик высокооборотной электромеханической системы с локализованной кавитационной нагрузкой // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2007. № 3. С. 38–44.

23. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М: Наука, 1964. 410 с.

24. Герц М.Е., Герц М.М. Синтез авторезонансных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 2. С. 22–27.

References

1. Akulov Yu.P. *Penetrator dlya issledovaniya poverkhnosti nebesnykh tel* [Penetrator for studying the surface of celestial bodies]. Patent RU no. 2111900, 1998. (In Russ.)

2. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Bao X. Smart Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (SUSDC). Pat. US no. 6863136 B2, 2005.

3. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Bao X. Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD). Pat. US no. 6968910 B2, 2005.

4. Bar-Cohen Y., Sherrit S. Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor. Pat. US 7156189 B1, 2007.

5. Aldrich J.B., Bar-Cohen Y. et al. Percussive augments of rotary drills for operating as a rotary-hammer drill. Pat. US no. 8640786 B2, 2014.

6. Genne D.V., Kostenko V.I., Mitrofanov I.G. et al. *Ul'trazvukovoy bur* [Ultrasonic drill]. Patent RU no. 2598947, 2016. (In Russ.)

7. Genne D.V., Kostenko V.I., Mitrofanov I.G. et al. *Ul'trazvukovoe gruntozabornoe ustroystvo* [Ultra-sonic soil sampling device]. Patent RU no. 2503815, 2018. (In Russ.)

8. Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z., Sherrit S. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC). *IEEE Transactions of Ultrasonics, Sonics and Frequency Control*. 2003;50(9):1147–1160. DOI: 10.1109/tuffc.2003.1235326

9. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Bao X., Badescu M. Subsurface sampler and sensors platform using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC). In: *Paper 6529-18, Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium*. San Diego, CA, March 19–22, 2007. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.715048

10. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Chang Z., Krahe R. Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications. *Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems*. 2001;4327:441–449. DOI: 10.1117/12.436556

11. Chang Z., Sherrit S., Badescu M., Bao X., Bar-Cohen Y. Design and analysis of ultrasonic actuator in consideration of length-reduction for a USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer). In: *Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference*. 2005;5762(10):563–571. DOI: 10.1117/12.598851

12. Sherrit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*. 1999. Vol. 1. P. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482

13. Harkness P., Lucas M., Cardoni A. Maximization of the Effective Impulse Delivered by a High-Frequency/Low-Frequency Planetary Drill Tool. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2011;58(11):2387–2396. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.2096

14. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Slivin A.N. Increasing of efficiency of ultrasonic vibration system work for cavitation treating of liquid. In: *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018: Conference proceedings*. Novosibirsk: NSTU; 2018. P. 287–291. (In Russ.)

15. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Genne D.V. Development of an ultrasonic oscillatory system for drilling lunar soil. In: *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019: Conference proceedings*. Novosibirsk: NSTU; 2019. P. 174–186. (In Russ.)

16. Ganiev R. *Marsokhod InSight perestal burit' skvazhinu na Marse. Chto proizoshlo?* [The InSight rover has stopped drilling on Mars. What happened?]. (In Russ.) Available at: <https://hi-news.ru/technology/marsoxod-insight-perestal-burit-skvazhinu-na-marse-chto-proizoshlo.html> (accessed 4 April 2024).

17. Nekrasov S.G., Perminov S.V., Vibrator Model for Design of Vibration Machines. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry. 2021;21(4):15–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin210402

18. Kikuchi E. (Ed.). *Ultrasonic Transducers*. Tokio: Corona Publishing Company; 1969. 472 p.

19. Birger I.A., Panovko Ya.G. (Eds.). *Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya: spravochnik: v 3 t. T. 1* [Strength. Stability. Vibrations: reference book: in 3 volumes. Vol. 1]. Moscow: Mashinostroenie; 1968. 821 p. (In Russ.)

20. Panovko Ya.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to mechanical shock theory]. Moscow: Nauka; 1977. 224 p. (In Russ.)

21. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Some questions of the theory of blow. *Online journal "Naukovedenie"*. 2013;(5):1–15. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (accessed 4 April 2024).

22. Nekrasov S.G. Dissolved in liquid gas amount measurement on the basis of resonance characteristics of high-q electromechanical system with localized cavitation load. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2007;(3):38–44. (In Russ.)

23. Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu. *Vibratsionnoe peremeshchenie*. [Vibratory movement]. Moscow: Nauka; 1964. 410 p. (In Russ.)

24. Gerts M.E., Gerts M.M. [Synthesis of autoresonance machines]. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2006;(2):22–27. (In Russ.)

Информация об авторах

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

Перминов Сергей Васильевич, главный инженер, АО «Медприбор», Челябинск, Россия; info@medpribor.net.

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

Кодкин Владимир Львович, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kodkinvl@susu.ru.

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

Information about the authors

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

Sergey V. Perminov, Chief engineer, Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia, info@medpribor.net.

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

Vladimir L. Kodkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kodkinvl@susu.ru.

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

Статья поступила в редакцию 05.04.2024

The article was submitted 05.04.2024

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.Н. Ефанов¹, efanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5917-2910>
Н.С. Иванова¹, ivanova@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0004-2194-2723>
В.Г. Разумов², wisewolf7778@gmail.com

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

² ООО «СИНТЕР», Челябинск, Россия

Аннотация. Задача оценки остаточного ресурса сложных технических систем становится в последнее время все более актуальной. Для достоверной оценки этого показателя требуется обрабатывать большие массивы данных о текущем состоянии исследуемой системы. При этом задача реконструкции модели развития процессов деградации, приводящих к возникновению отказов, требует решения целого ряда проблем. В связи с этим возникает необходимость применения интеллектуальных методов обработки данных, к числу которых относятся методы анализа аномалий временных рядов. **Цель исследования:** разработка метода выявления контекстных аномалий временных рядов, позволяющего определить степень развития процессов деградации, которые приводят к возникновению отказов. **Методы.** Установлена аналогия между методами машинного обучения в контролируемом, полуконтролируемом и неконтролируемом режимах и группами методов обнаружения аномалий, различающихся в зависимости от степени доступности меток, которые характеризуют свойства и признаки соответствующих временных рядов, что позволило с единых позиций оценить особенности простых и сложных аномалий. **Результаты.** Разработан спектральный метод анализа контекстных аномалий временных рядов, который, в отличие от известных спектральных методов, предусматривающих частотный анализ временных рядов, использует специальный базис экспоненциальных функций; изложена методика расчета спектральных коэффициентов исследуемых временных рядов, на основе которых вычисляется обобщенный атрибут, позволяющий отнести исследуемый случай к нормальной или аномальной группе. **Заключение.** Предложенный метод оценки остаточного ресурса сложных технических систем на основе анализа аномалий временных рядов позволяет своевременно выявлять возникновение и развитие процессов деградации, приводящих к возникновению отказов, что повышает надежность и безопасность технических систем, а также снижает затраты и время на их обслуживание.

Ключевые слова: сложные технические системы, остаточный ресурс, аномалии временных рядов, спектральный метод, газотурбинный двигатель

Для цитирования: Ефанов В.Н., Иванова Н.С., Разумов В.Г. Интеллектуальная технология оценки остаточного ресурса сложных технических систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 54–66. DOI: 10.14529/ctcr240305

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240305

INTELLIGENT TECHNOLOGY FOR ASSESSING THE REMAINING USEFUL LIFE OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

V.N. Efanov¹, efanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5917-2910>
N.S. Ivanova¹, ivanova@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0004-2194-2723>
V.G. Razumov², wisewolf7778@gmail.com

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

² LLC SINTER, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The task of estimating the residual life of complex technical systems has recently become increasingly important. For the pre-trustworthy estimation of this indicator it is required to process large arrays of data on the current state of the system under study. At the same time the task of reconstruction of the model of degradation processes development leading to the occurrence of failures requires solving a number of problems. In this regard, there is a need to use intelligent methods of data processing, which include methods of time series anomaly analysis. **Purpose of the study:** development of a method for detecting contextual anomalies of time series, allowing to determine the degree of development of degradation processes that lead to the occurrence of failures. **Methods.** An analogy was established between machine learning methods in supervised, semi-supervised and unsupervised modes and groups of anomaly detection methods differing depending on the degree of availability of labels that characterize the properties and attributes of the corresponding time series, which made it possible to evaluate the features of simple and complex anomalies from unified positions. **Results.** A spectral method for the analysis of contextual anomalies of time series has been developed, which, in contrast to the known spectral methods involving frequency analysis of time series, uses a special basis of exponential functions; the methodology for calculating the spectral coefficients of the investigated time series, on the basis of which a generalized attribute is calculated, allowing to attribute the investigated case to a normal or anomalous group, is outlined. **Conclusion.** The proposed method of estimating the residual life of complex technical systems based on the analysis of time series anomalies allows timely detection of the occurrence and development of degradation processes leading to the occurrence of failures, which increases the reliability and safety of technical systems, as well as reduces costs and time for their maintenance.

Keywords: complex technical systems, residual resource, time series anomalies, spectral method, gas turbine engine

For citation: Efanov V.N., Ivanova N.S., Razumov V.G. Intelligent technology for assessing the remaining useful life of complex technical systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3): 54–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240305

Введение

Интеллектуальные технологии, позволяющие оценивать состояние сложных технических систем, приобретают в последнее время все более важное значение. Это связано с использованием концепции безопасной эксплуатации объектов по их техническому состоянию, которая предусматривает сравнение фактических значений параметров технического состояния во время эксплуатации с их предельно допустимыми значениями и последующее определение по результатам такого сравнения остаточного ресурса объекта. Остаточный ресурс – это важный показатель, используемый во многих промышленных системах и определяемый как суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние [1]. Его точный прогноз позволяет заранее планировать проведение технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта, что является важной гарантией повышения надежности и безопасности объекта, а также снижает затраты и время на его обслуживание. Для сбора исчерпывающей информации о состоянии сложной технической системы используется множество датчиков разнообразных физических параметров, которые выдают большие массивы данных, как правило, в виде временных рядов. Временной ряд обычно рассматривается как последовательность значений некоторой физической величины, регистрируемых через некоторые, часто постоянные,

промежутки времени. Учитывая возможности современных цифровых технологий обработки больших данных, методы, основанные на данных, считаются предпочтительными для оценки остаточного ресурса технических систем.

Однако эта задача требует решения целого ряда проблем. Первая из этих проблем, имеющая концептуальный характер, связана с возможностью реконструкции на основе временных рядов модели развития процессов деградации, приводящих к возникновению отказов. Дело в том, что в состав сложных технических систем входят разнообразные механические, электрические, гидравлические и пневматические узлы и устройства. Во время эксплуатации детали и конструкции деформируются, изнашиваются, поражаются коррозией и эрозией, в них образуются трещины, изменяются структура и механические свойства материалов.

При этом деградационные процессы, приводящие к трещинам и другим подобным дефектам, имеют нестационарный и распределенный характер. Чтобы определить возможность конечного описания распределенной динамической системы, используемые временные ряды должны обеспечить возможность найти наименьшее количество переменных состояния исследуемой системы. Это число, получившее название размерности вложения, позволяет адекватно оценивать систему, поведение которой описывают эти временные ряды. Такая возможность обусловлена свойствами временных рядов – их числом и количеством членов в каждом из них.

В работах [2–4] приводится алгоритм Грассбергера – Прокаччия, позволяющий аналитически оценить величину размерности вложения. Наряду с этим методом, который не позволяет работать с достаточно короткими временными рядами и требует значительных вычислительных затрат, на практике широко используются эмпирические методы определения величины размерности вложения. При этом в качестве размерности вложения принимается такое значение, начиная с которого прекращается качественное изменение оценки технического состояния. В этих же работах приводятся рекомендации по выбору числа и размерности временных рядов, которые свидетельствуют о том, что оценить пространство состояний заданной размерности можно только с помощью многомерных временных рядов с числом членов, превышающим десятки тысяч.

Такая задача является непростой даже при использовании цифровых технологий обработки больших данных. Дело в том, что большие данные обладают рядом особенностей, которые не свойственны традиционным наборам данных. К числу таких особенностей относятся: накопление шума, ложная корреляция и случайная эндогенность. Ошибки накапливаются, когда необходимо одновременно оценивать много параметров. Случайная эндогенность возникает, когда появляется зависимость между правильными данными и случайными ошибками модели. Но в нашем случае особо важную роль играет ложная корреляция. Как отмечалось выше, для контроля состояния сложных технических систем используется несколько датчиков. Чтобы получить исчерпывающую информацию о состоянии исследуемого объекта, часто прибегают к объединению данных с нескольких датчиков. При этом объединение похожих, но относящихся к различным состояниям данных может привести к неверной оценке действительного состояния системы.

Отмеченные свойства экспериментальных рядов, получаемых в результате непрерывных длительных наблюдений, требуют применения специальных приемов и методов при обработке и анализе данных. Используемый при этом класс методов искусственного интеллекта, которые позволяют улучшить результаты принятия решений в слабоструктурированных ситуациях путем обучения на известных данных, относится к разряду методов машинного обучения. При этом методы машинного обучения делятся на несколько характерных групп в зависимости от того, какие данные они используют.

Неконтролируемое обучение использует немаркированные данные. Это, как правило, необработанные данные, которые формируются на основе исходной информации о состоянии исследуемого технического объекта, поступающей от разнообразных датчиков физических параметров. Специфика неконтролируемого обучения заключается в том, что информация о состоянии технического объекта, которое необходимо оценить, отсутствует в обучающих данных. При этом обучение происходит только на основе известных значений входных параметров. Система машинного обучения сама должна найти способ обучения. Это создает менее прогнозируемую среду для контроля технического состояния, поскольку отсутствует информация об ожидаемых результатах обучения.

В свою очередь, контролируемое обучение использует маркированные данные. Маркированными считают наборы данных, относительно которых выявлен или установлен какой-либо ха-

рактерный признак. Применительно к задаче оценки технического состояния такими признаками могут служить возможные отказы технических объектов. Это означает, что маркированные данные содержат не только информацию о входных параметрах для системы машинного обучения, но и целевое значение выходных переменных, которое нужно получить в ходе обучения. Маркирование данных производится на основе экспертной оценки специалистов в соответствующей предметной области. При этом оценка оказывается тем более достоверной, чем сильнее отличаются признаки, характеризующие различные состояния технического объекта. Такая ситуация возникает, если в объекте превалирует какой-то один тип отказа или различные типы отказов разнесены во времени. Однако на практике чаще всего предпосылки для различных отказов возникают одновременно. Это обуславливает неопределенность в оценке проблемных областей, что может привести к неправильной классификации технического состояния.

Такие ошибки могут повлечь за собой неустранимую погрешность в обучающих данных, с которой не справится ни один алгоритм машинного обучения. В этом случае более продуктивным может оказаться подход, позволяющий своевременно выявить нарушение нормального режима работы объекта с последующей детализацией его технического состояния. С этой целью предлагается методика, основанная на анализе аномалий временных рядов.

1. Анализ аномалий временных рядов

Обнаружение аномалий является важной проблемой для многих прикладных областей. В связи с этим предлагается множество методов поиска аномалий [5–16], которые были специально разработаны для определенных областей применения. Общим для большинства этих методов является определение области, представляющей нормальное поведение, и поиск объектов, которые не соответствуют ожидаемому нормальному поведению. Однако такой очевидный подход сталкивается с целым рядом проблем. В первую очередь это связано с тем, что бывает крайне трудно определить область, которая будет охватывать все возможные варианты нормального поведения сложных технических систем. Особенно в ситуациях, когда нормальное поведение объекта может меняться и может не соответствовать текущему представлению о нормальном поведении. Кроме того, границы области нормального поведения часто бывают размытыми и нечеткими, а сами области нормального и аномального поведения могут перекрываться. Помимо этого, на точность обнаружения аномалий сильно влияет шум в данных, который часто похож на реальные аномалии и поэтому его трудно выявить и удалить.

С учетом существующих особенностей областей нормального и аномального поведения принято различать простые и сложные аномалии.

К простым относятся точечные аномалии, когда наблюдается резкое отклонение значений наблюдаемых параметров в отдельных точках. Такие «выбросы» легко обнаружить, установив допустимый диапазон изменения наблюдаемых параметров.

В свою очередь, к сложным аномалиям относятся коллективные или групповые аномалии и аномалии контекста,

В коллективных аномалиях аномально ведет себя некоторый набор экземпляров данных. При этом отдельные экземпляры данных из этого набора могут не быть аномалиями сами по себе, но их появление в совокупности является аномальным.

Контекстуальной или условной аномалией называют ситуацию, когда данный временной ряд считается аномальным в определенных условиях, в то время как временной ряд с аналогичными свойствами признается нормальным в других условиях. При этом понятие контекстуальной аномалии определяется характерными особенностями временных рядов, которые могут быть описаны с помощью некоторой совокупности атрибутов. В качестве атрибутов могут использоваться характеристики, свойства, признаки соответствующего набора данных. Для обнаружения контекстуальных аномалий необходимо установить, являются значения атрибутов нормальными или аномальными для данного контекста.

Таким образом, обнаружение контекстуальных аномалий базируется на использовании маркированных данных. Метки в этом случае определяют, является ли соответствующий экземпляр данных нормальным или аномальным. В зависимости от степени доступности меток методы обнаружения аномалий делятся на три группы, аналогично тому, как подразделяются методы машинного обучения [17–23].

Обнаружение аномалий в контролируемом режиме. Эти методы предполагают наличие обучающего набора данных, который содержит помеченные экземпляры для нормальных и аномальных классов. К этой группе относятся методы на основе классификации и на основе правил. Методы обнаружения аномалий на основе классификации предполагают, что существует классификатор, который может различать нормальные и аномальные классы в заданном пространстве признаков. В результате такой классификатор на этапе тестирования относит исследуемый экземпляр к числу нормальных или аномальных. В свою очередь методы обнаружения аномалий на основе правил разрабатывают правила, которые отражают нормальное поведение системы. Тестируемый экземпляр, который не подпадает ни под одно из таких правил, считается аномалией. Методы, которые работают в контролируемом режиме, обладают всеми недостатками методов, использующих маркированные данные. Во-первых, получение точных и достоверных меток для широкого круга аномалий является сложной задачей. Кроме того, аномальных экземпляров гораздо меньше, чем нормальных. Это приводит к несбалансированности обучающих выборок.

Обнаружение аномалий в полуконтролируемом режиме. Методы, которые работают в полуконтролируемом режиме, предполагают, что в обучающих данных есть метки только для нормального класса. При этом выявление аномалий в исследуемых экземплярах данных заключается в предположении, что нормальные экземпляры находятся в плотном окружении, в то время как аномалии возникают вдали от нормальных экземпляров. В качестве оценки аномалии используется либо расстояние исследуемого экземпляра данных до его ближайших соседей, либо относительная плотность его окружения. В первом случае методы обнаружения аномалии делятся на две категории: оценка аномальности исследуемого экземпляра данных находится как сумма его расстояний до заданного числа ближайших соседей или как количество ближайших соседей, которые находятся на расстоянии, не более заданного, от данного экземпляра данных. Методы обнаружения аномалий на основе плотности оценивают плотность окружения каждого экземпляра данных. Экземпляр, находящийся в районе с низкой плотностью, объявляется аномальным, а экземпляр, находящийся в плотном районе, – нормальным.

Эффективность этих методов во многом зависит от выбранной метрики, оценивающей расстояние между каждой парой экземпляров данных. Метрика должна надежно различать нормальные и аномальные экземпляры. Выбор такой метрики часто оказывается сложной задачей. Еще одна особенность рассмотренных методов заключается в том, что могут возникать ситуации, когда есть нормальные экземпляры, у которых недостаточно близких соседей, или есть аномалии, у которых достаточно близких соседей. В этом случае процент ошибок оказывается высоким. Вычислительная сложность полуконтролируемых методов также является значительной проблемой, поскольку они предусматривают вычисление расстояния между каждым тестовым экземпляром и всеми экземплярами, принадлежащими либо к самим тестовым данным, либо к обучающим данным.

Обнаружение аномалий в неконтролируемом режиме. Методы этой группы не требуют обучающих данных, и поэтому они широко используются на практике. Однако эти методы действуют эффективно, если в исследуемых данных нормальные случаи встречаются гораздо чаще, чем аномалии. Если это предположение не верно, то такие методы допускают большое количество ошибок. В основе методов обнаружения аномалий в неконтролируемом режиме лежит принцип кластеризации.

Этот подход предусматривает распределение всех нормальных наборов данных между определенным количеством кластеров, в то время как для аномальных наборов такие кластеры не определены. Следовательно, достаточно установить, относится представленный экземпляр данных к какому-либо кластеру или нет. Если исследуемый экземпляр не относится ни к одному из кластеров, он объявляется аномальным. При этом может использоваться какой-либо из известных алгоритмов кластеризации. Недостатком таких методов является то, что они не оптимизированы для поиска аномалий, поскольку основной целью алгоритма кластеризации является поиск кластеров. В связи с этим при поиске аномалий было предложено несколько модификаций алгоритма кластеризации. Одна из таких модификаций использует то обстоятельство, что нормальные экземпляры данных лежат рядом с ядром ближайшего кластера, в то время как аномалии нахо-

дятся далеко от ядра такого кластера. Однако если аномалии в данных сами по себе образуют кластеры, эти методы не смогут их обнаружить. Для решения этой проблемы была предложена модификация, которая предусматривает, что нормальные экземпляры данных принадлежат к большим и плотным кластерам, а аномалии – к маленьким или разреженным кластерам.

Недостатки методов обнаружения аномалий на основе кластеризации связаны также с погрешностями алгоритмов кластеризации, которые не различают особенностей в кластерной структуре нормальных и аномальных экземпляров. С учетом того, что алгоритм кластеризации должен отнести каждый экземпляр исследуемых данных к какому-либо кластеру, это приводит к тому, что аномалии часто относятся к кластеру большего размера. В результате такие данные будут рассматриваться как нормальные экземпляры.

Анализ рассмотренных методов обнаружения аномалий позволяет оценить те из них, которые наиболее приспособлены для работы с контекстными аномалиями. В целом их можно разделить на следующие группы.

Первая группа методов позволяет решать проблему обнаружения контекстуальных аномалий в ситуациях, когда в рамках данного контекста встречаются только отдельные экземпляры данных, которые являются аномальными. В этом случае для поиска контекстуальных аномалий предлагается использовать алгоритмы обнаружения точечных аномалий, адаптированные к условиям данного контекста.

Вторая группа методов моделирует структуру данных и использует эту модель для обнаружения аномалий. Общая методика обнаружения аномалий в этой группе методов сводится к следующему. На основе обучающих данных строится модель, которая может предсказать ожидаемое поведение в заданном контексте. Если ожидаемое поведение значительно отличается от наблюдаемого, то это считается аномалией. Обычно эта методика используется при выявлении аномалий во временных рядах. В частности, было разработано несколько методов моделирования временных рядов на основе регрессии. При этом любое наблюдение проверяется на аномальность путем сравнения с ковариационной матрицей авторегрессионного процесса. Если наблюдение выходит за пределы моделируемой ошибки для процесса, оно объявляется аномалией.

В третью группу входят методы, основанные на информационном содержании набора данных. В этом случае исходят из предположения, что аномалии вызывают нарушения в информационном содержании набора данных. Информационно-теоретические методы анализируют информационное содержание набора данных, используя различные информационно-теоретические меры, такие как сложность, энтропия и т. д. Очевидным преимуществом этих методов является то, что они не делают никаких предположений об исходных значениях концептуальных атрибутов в исследуемых данных.

Особое место занимает группа спектральных методов обнаружения аномалий. Эти методы используют то обстоятельство, что исходные данные могут быть преобразованы таким образом, чтобы атрибуты нормальных и аномальных экземпляров существенно отличались друг от друга. Это может потребовать преобразования временных рядов в функциональные зависимости, определенные в других метрических пространствах. Характерным примером таких преобразований является отображение периодических временных рядов в частотную область. Такое преобразование будет обладать еще одним преимуществом, если временные ряды будут вложены в пространство более низкой размерности. Все это определяет основную задачу, которая стоит перед спектральными методами обнаружения аномалий. Суть этой задачи заключается в поиске таких пространств, в которых аномальные экземпляры могут быть легко идентифицированы. Спектральные методы автоматически выполняют сокращение размерности и, следовательно, подходят для работы с наборами данных высокой размерности. Дело в том, что при разложении временной зависимости в спектральный ряд, достаточно сохранять информацию только о коэффициентах такого ряда. Более того, такие разложения могут служить для нормализации экспериментальных временных рядов. Данные, полученные от различных датчиков, могут иметь разную длину и быть измеренными в различные моменты времени. Данные, восстановленные по их спектральным характеристикам, всегда будут иметь одинаковый формат.

Рассмотрим метод анализа аномалий временных рядов, основанный на их разложении в спектральный ряд по специальному базису экспоненциальных функций.

2. Разработка и исследование спектрального метода анализа аномалий временных рядов

Обычно когда говорят о спектральном анализе временных рядов, то предполагается их описание в частотной области. Однако корректным такой подход является только в случае периодических и стационарных временных рядов. Применительно к сложным динамическим системам эти условия часто не выполняются. В связи с этим в качестве базиса спектрального разложения предлагается использовать пространство на основе линейно-независимых функций $\psi_k(t) = \exp(-(k-1)\beta t)$, $\beta > 0$, $k = 1, 2, \dots$. Дальнейшая процедура формирования базиса спектрального разложения предусматривает построение системы функций следующего вида:

$$\varphi_l(t) = \sum_{k=1}^l \lambda_{lk} \cdot \psi_k(t), \quad l = 1, 2, \dots, r-1, \quad (1)$$

здесь ряд коэффициентов принимает следующее значение $\lambda_{ll} = 1$, а остальные, при $l \neq k$, определяются из системы уравнений:

$$\langle \varphi_l; \varphi_r \rangle = \int_0^{\infty} p(t) \varphi_l(t) \varphi_r(t) dt = 0, \quad r = 2, 3, \dots; \quad l = 1, 2, \dots, r-1. \quad (2)$$

При выполнении условий (2) функции (1) становятся ортогональными с весом $p(t) = \exp(-\alpha t)$, $\alpha \geq 0$. Это означает, что в полученном спектральном базисе может быть разложена любая функция, скорость роста которой не превышает экспоненты с показателем $\alpha \geq 0$.

В работах [24, 25] приводится формула Родрига, которая позволяет в общем виде найти решение системы уравнений (2):

$$\varphi_{l+1}(t) = \frac{(-1)^l \sqrt{\delta + 2l + 1}}{l!} \cdot e^{\beta \delta t} \left[e^{-\beta(\delta+l)t} (1 - e^{-\beta t})^l \right]_{e^{-\beta t}}^{(l)}. \quad (3)$$

Здесь используется параметр следующего вида $\delta = (\alpha - \beta)/\beta$.

Если в формуле (3) продифференцировать выражение в квадратных скобках l раз по аргументу $e^{-\beta t}$, то искомые функции (1) можно представить в следующем виде:

$$\varphi_{l+1}(t) = \sum_{k=0}^l (-1)^{k+l} \frac{\Gamma(k+l+\delta+1) \sqrt{(\delta+2l+1)\beta}}{k!(l-k)!\Gamma(k+\delta+1)} e^{-\beta k t},$$

где $\Gamma(x)$ – интеграл Эйлера второго рода (гамма-функция).

В результате получаем аналитическое выражение для коэффициентов спектральных функций (1):

$$\lambda_{l+1,k+1} = \frac{(-1)^{k+l} \Gamma(k+l+\delta+1) \sqrt{(\delta+2l+1)\beta}}{k!(l-k)!\Gamma(k+\delta+1)}. \quad (4)$$

Сформированная система спектральных функций позволяет описывать временные зависимости, полученные в ходе мониторинга исследуемых объектов, в виде следующего ряда:

$$y(t) = \sum_{l=1}^q a_l \cdot \varphi_l(t), \quad (5)$$

где a_l – коэффициенты спектрального разложения, которые можно рассматривать как коэффициенты соответствующего ортогонального ряда:

$$a_l = \int_0^{\infty} p(t) \cdot y(t) \cdot \varphi_l(t) dt. \quad (6)$$

Что касается сходимости предложенного спектрального разложения, то в отличие от обычных ортогональных рядов, которые гарантируют сходимость только в смысле среднеквадратического отклонения, оно обеспечивает сильную, равномерную сходимость. Это следует из соотно-

шений, приведенных в [24, 25], которые показывают, что при росте числа членов ряда к нулю стремится абсолютная погрешность подобной аппроксимации

$$\left| y(t) - \sum_{l=1}^q a_l \varphi_l(t) \right| \leq \frac{C_0 q (\delta + q) \sqrt{\delta + 2q - 1} |\varphi_{q+1}(t)|}{(\delta + 2q - 1)(\delta + 2q) \sqrt{\delta + 2q + 1} \cdot q^{r+\gamma}}.$$

Таким образом, задача аппроксимации временных зависимостей предложенным спектральным описанием является корректной как по Адамару, так и по Тихонову.

Следует отметить, что использование спектральной аппроксимации (5) позволяет исследовать временные ряды с одинаковым числом членов и рассчитанные в одни и те же моменты времени. Как отмечалось ранее, в реальных условиях эксплуатации и даже при стендовых испытаниях для измерения различных физических параметров используют датчики с разными метрологическими характеристиками. Это не позволяет получить временные ряды одного формата. Для нормирования экспериментально полученных временных рядов предлагается сначала разложить эти временные зависимости по системе спектральных функций, как это было описано выше. Затем, используя полученные разложения, можно вычислить необходимое количество членов временного ряда, необходимых для оценки состояния объекта, причем с заданными характеристиками. После этого можно использовать это описание для нахождения значений контекстных атрибутов.

Поскольку экспериментально снятые временные характеристики исследуемых систем представлены в виде многомерных временных рядов $D_k = [y_k(t_i)]_{1 \times m}$, $k = \overline{1, N}$, то формула (5) приобретает вид

$$a_j^k = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{y_k(t_i) p(t_i) \varphi_j(t_i) + y_k(t_{i+1}) p(t_{i+1}) \varphi_j(t_{i+1})}{2} \cdot (t_{i+1} - t_i), \quad j = \overline{1, q}. \quad (7)$$

Полученные спектральные коэффициенты являются атрибутами исследуемых временных рядов. Для оценки состояния контролируемого объекта необходимо определить степень близости атрибутов анализируемого случая к соответствующим атрибутам нормальных экземпляров данных. Это достаточно стандартная задача нахождения расстояния в пространстве параметров. Для ее решения в настоящее время используется большое количество разнообразных метрик, наиболее популярными из которых считаются евклидова, манхэттенская и равномерная метрики, а также метрика Минковского. Причем если в ходе исследования удастся получить репрезентативные выборки маркированных данных, соответствующих типовым отказам контролируемого объекта, то такой подход можно будет использовать не только для выявления аномалий, но и для диагностики неисправностей.

Мы будем использовать метрику, аналогичную евклидовой:

$$H[D_k] = \sum_{j=1}^q (a_j^k)^2, \quad k = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Предлагаемый метод анализа аномалий временных рядов реализуется в два этапа. На первом этапе проводится расчет спектральных коэффициентов по формуле (7).

На втором этапе вычисляется обобщенный атрибут исследуемого случая (8). Если отклонение этой величины от значений, соответствующих нормальному процессу, выходит за пределы допустимой ошибки, то такой случай объявляется аномалией.

Проиллюстрируем предложенный метод на примере оценки технического состояния газотурбинного двигателя.

3. Оценка технического состояния газотурбинного двигателя

В табл. 1 представлены экспериментально снятые зависимости частоты вращения ротора турбокомпрессора для исправного двигателя ($k = 1$) и при наличии расцентровки ротора турбокомпрессора ($k = 2$).

Временные ряды для частоты вращения ротора турбокомпрессора

Таблица 1

Table 1

Time series for turbocharger rotor speed

t, c	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
D_1	0	0,161	0,297	0,410	0,460	0,537	0,621	0,681	0,733	0,776	0,795
D_2	0	0,327	0,547	0,695	0,747	0,831	0,887	0,924	0,948	0,962	0,971

Обе эти временные последовательности являются аналогичными в контексте динамики протекающих процессов. Рассмотрим, позволят ли контекстные атрибуты (7) и (8) выявить аномалию в работе двигателя. Для этого рассчитаем значения этих атрибутов. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Контекстные атрибуты временных рядов

Таблица 2

Table 2

Contextual attributes of time series

j	1	2	3	4	5
a_j^1	0,44444	0,27494	0,01846	0,00632	0,00235
a_j^2	0,642864	0,293001	0,063044	0,002520	0,0000021
$H[D_1]$	0,19753	0,27312	0,27346	0,27350	0,27350
$H[D_2]$	0,413274	0,499124	0,503098	0,503105	0,503105

Как следует из приведенных данных, метрика (8) практически перестала изменяться при пяти членах спектрального ряда. Следовательно, этого числа достаточно для спектрального разложения временных рядов с требуемой точностью. При этом величина метрики для второго временного ряда практически в два раза превышает аналогичную величину для первого ряда. Это свидетельствует об аномалии в работе двигателя.

Заключение

В работе предложен новый подход к оценке состояния сложных технических систем на основе анализа аномалий временных рядов. Такой анализ позволяет выявить тенденции изменения состояний контролируемого объекта, в том числе связанные с появлением и развитием дефектов. Для этого необходимо, чтобы полученные экспериментальные зависимости отвечали достаточно жестким требованиям к числу и размерности временных рядов, позволяющих достоверно оценивать состояние контролируемого объекта. Необходимость обработки больших массивов данных потребовала применения специальных методов искусственного интеллекта, которые позволяют улучшить результаты принятия решений в слабоструктурированных ситуациях путем обучения на известных данных. Используемые при этом методы машинного обучения предусматривают определение областей, представляющих нормальное поведение, и обеспечивают поиск объектов, которые не соответствуют ожидаемому нормальному поведению.

Проведенный в работе анализ методов обнаружения аномалий в различных режимах позволил оценить те из них, которые оказались наиболее приспособленными для работы с контекстными аномалиями. К их числу относятся спектральные методы обнаружения аномалий. Эти методы используют подпространства более низкой размерности, в котором атрибуты нормальных и аномальных экземпляров существенно отличаются друг от друга. Предложен метод анализа аномалий временных рядов, основанный на их разложении в спектральный ряд по специальному базису экспоненциальных функций. Показано, что предложенная компактная форма описания временных рядов в среде ортогональных функций обеспечивает равномерную сходимость, что гарантирует достоверность оценки состояния контролируемого объекта. Необходимо отметить, что предложенный метод позволяет выявлять аномалии не только в полуконтролируемом, но и в неконтролируемом режиме. Рассмотренный пример оценки состояния газотурбинного двигателя с

возможным дефектом ротора турбокомпрессора подтверждает, что предложенная методика позволяет получать правильный диагноз.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2016-06-21. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. М: Стандартинформ, 2015. 28 с.
2. Истомина И.А., Котляров О.Л., Лоскутов А.Ю. К проблеме обработки временных рядов: расширение возможностей метода локальной аппроксимации посредством сингулярного спектрального анализа // Теоретическая и математическая физика. 2005. Т. 142, № 1. С. 148–159. DOI: 10.4213/tmf1771
3. Лоскутов А.Ю., Козлов А.А., Хаханов Ю.М. Энтропия и прогноз временных рядов в теории динамических систем // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 4. С. 98–113. DOI: 10.18500/0869-6632-2009-17-4-98-113
4. Efanov V.N., Ivanova N.S. Expert System for Assessing the Technical Status of Gas Turbine Engines Using the Knowledge Base of Temporal Precedents // Russian Aeronautics. 2023. Vol. 66, no. 1. P. 64–71. DOI: 10.3103/S1068799823010099
5. A GPU Algorithm for Detecting Contextual Outliers in Multiple Concurrent Data Streams / A. Borah, L. Gruenwald, E. Leal, E. Panjei // Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Orlando, FL, USA, 2021. P. 2737–2742. DOI: 10.1109/BigData52589.2021.9671460
6. Trajectory Outlier Detection on Trajectory Data Streams / K. Cao, Y. Liu, G. Meng et al. // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 34187–34196. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974521
7. A Framework for Local Outlier Detection from Spatio-Temporal Trajectory Datasets / X. Cai, B. Aydin, A. Ji, R. Angryk // Proceedings of 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Milan, Italy, 2021. P. 5682–5689. DOI: 10.1109/ICPR48806.2021.9412274
8. Telemetry Data-based Spacecraft Anomaly Detection Using Generative Adversarial Networks / Y. Song, J. Yu, D. Tang et al. // Proceedings of 2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Xi'an, China, 2020. P. 297–301. DOI: 10.1109/ICSMD50554.2020.9261736
9. Haj-Hassan A., Habib C., Nassar J. Real-time Spatio-Temporal based Outlier Detection Framework for Wireless Body Sensor Networks // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). New Delhi, India, 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ANTS50601.2020.9342827
10. STAD: Spatio-Temporal Anomaly Detection Mechanism for Mobile Network Management / A. Dridi, C. Boucetta, S.E. Hammami et al. // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2021. Vol. 18, no. 1. P. 894–906. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3048131
11. An Efficient Outlier Detection and Classification Clustering-Based Approach for WSN / M. Al Samara, I. Bennis, A. Abouaissa, P. Lorenz // Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Madrid, Spain, 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685756
12. A Novel Outlier Detection Model for Vibration Signals Using Transformer Networks / R. Zhang, Q. Zhou, L. Tian et al. // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 57234–57241. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3178373
13. An Unsupervised TCN-based Outlier Detection for Time Series with Seasonality and Trend / R. Mo, Y. Pei, N. Venkatarayalu et al. // Proceedings of 2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS). Osaka, Japan, 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/APWCS50173.2021.9548759
14. STLP-OD: Spatial and Temporal Label Propagation for Traffic Outlier Detection / J. Pu, Y. Wang, X. Liu, X. Zhang // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 63036–63044. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916853
15. Fitters W., Cuzzocrea A., Hassani M. Enhancing LSTM Prediction of Vehicle Traffic Flow Data via Outlier Correlations // Proceedings of 2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). Madrid, Spain, 2021. P. 210-217. DOI: 10.1109/COMPSAC51774.2021.00039
16. Romero M., Estévez P.A. Outlier Detection based on Transformations for Astronomical Time Series // Proceedings of 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Padua, Italy, 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892590

17. Zhang H., Li Z. Anomaly Detection Approach for Urban Sensing Based on Credibility and Time-Series Analysis Optimization Model // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 49102–49110. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909967
18. Anomaly Detection and Classification in Multispectral Time Series Based on Hidden Markov Models / K.M. León-López, F. Mouret, H. Arguello, J.-Y. Tournet // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. P. 1–11. Art no. 5402311. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3101127
19. DIM Moving Target Detection using Spatio-Temporal Anomaly Detection for Hyperspectral Image Sequences / Li Y., Wang J., Liu X. et al. // *Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia, Spain, 2018. P. 7086–7089. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517601
20. Lee J., Jeon C.-R., Kang S.-J. Performance Comparison of Soiling Detection Using Anomaly Detection Methodology // *Proceedings of 2022 19th International SoC Design Conference (ISOCC)*. Gangneung-si, Korea, Republic of, 2022. P. 229–230. DOI: 10.1109/ISOCC56007.2022.10031428
21. Hyperspectral Anomaly Detection With Multiscale Attribute and Edge-Preserving Filters / S. Li, K. Zhang, Q. Hao et al. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. Vol. 15, no. 10. P. 1605–1609. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2853705
22. Lee C., Kim J., Kang S.-J. Semi-supervised Anomaly Detection with Reinforcement Learning // *Proceedings of 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*. Phuket, Thailand, 2022. P. 933–936. DOI: 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9895028
23. Karim S.M.A., Ranjan N., Shah D. A Scalable Approach to Time Series Anomaly Detection & Failure Analysis for Industrial Systems // *Proceedings of 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. Las Vegas, NV, USA, 2020. P. 0678–0683. DOI: 10.1109/CCWC47524.2020.9031262
24. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
25. Никифоров А.Ф., Суслов С.К. Классические ортогональные полиномы. М.: Знание, 1985. 32 с.

References

1. *GOST 27.002–2015*. [Reliability in engineering. Terms and definitions: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2016-06-21. Federal agency on technical regulation and metrology. Ed. official]. Moscow: Standartinform; 2015. 28 p. (In Russ.)
2. Istomin I.A., Kotlyarov O.L., Loskutov A.Yu. [On the problem of time series processing: extending the possibilities of the local approximation method by means of singular spectral analysis]. *Theoretical and Mathematical Physics*. 2005;142(1):148–159. (In Russ.) DOI: 10.4213/tmf1771
3. Loskutov A.Yu., Kozlov A.A., Khakhanov Yu.M. Entropy and forecast of time series in the theory of dynamical systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Applied nonlinear dynamics*. 2009;17(4):98–113. (In Russ.) DOI: 10.18500/0869-6632-2009-17-4-98-113
4. Efanov V.N., Ivanova N.S. Expert System for Assessing the Technical Status of Gas Turbine Engines Using the Knowledge Base of Temporal Precedents. *Russian Aeronautics*. 2023;66(1):64–71. DOI: 10.3103/S1068799823010099
5. Borah A., Gruenwald L., Leal E., Panjei E. A GPU Algorithm for Detecting Contextual Outliers in Multiple Concurrent Data Streams. In: *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. Orlando, FL, USA; 2021. P. 2737–2742. DOI: 10.1109/BigData52589.2021.9671460
6. Cao K., Liu Y., Meng G., Liu H., Miao A., Xu J. Trajectory Outlier Detection on Trajectory Data Streams. *IEEE Access*. 2020;8:34187–34196. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974521
7. Cai X., Aydin B., Ji A., Angryk R. A Framework for Local Outlier Detection from Spatio-Temporal Trajectory Datasets. In: *Proceedings of 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. Milan, Italy; 2021. P. 5682–5689. DOI: 10.1109/ICPR48806.2021.9412274
8. Song Y., Yu J., Tang D., Han D., Wang S. Telemetry Data-based Spacecraft Anomaly Detection Using Generative Adversarial Networks. In: *Proceedings of 2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)*. Xi'an, China; 2020. P. 297–301. DOI: 10.1109/ICSMD50554.2020.9261736
9. Haj-Hassan A., Habib C., Nassar J. Real-time Spatio-Temporal based Outlier Detection Framework for Wireless Body Sensor Networks. In: *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on*

Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). New Delhi, India; 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ANTS50601.2020.9342827

10. Dridi A., Boucetta C., Hammami S.E., Afifi H., Mounghla H. STAD: Spatio-Temporal Anomaly Detection Mechanism for Mobile Network Management. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021;18(1):894–906. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3048131

11. Al Samara M., Bennis I., Abouaissa A., Lorenz P. An Efficient Outlier Detection and Classification Clustering-Based Approach for WSN. In: *Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Madrid, Spain; 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685756

12. Zhang R., Zhou Q., Tian L., Bai L., Zhang L. A Novel Outlier Detection Model for Vibration Signals Using Transformer Networks. *IEEE Access*. 2022;10:57234–57241. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3178373

13. Mo R., Pei Y., Venkatarayalu N., Nathaniel P., Premkumar A.B., Sun S. An Unsupervised TCN-based Outlier Detection for Time Series with Seasonality and Trend. In: *Proceedings of 2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*. Osaka, Japan; 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/APWCS50173.2021.9548759

14. Pu J., Wang Y., Liu X., Zhang X. STLP-OD: Spatial and Temporal Label Propagation for Traffic Outlier Detection. *IEEE Access*. 2019;7:63036–63044. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916853

15. Fitters W., Cuzzocrea A., Hassani M. Enhancing LSTM Prediction of Vehicle Traffic Flow Data via Outlier Correlations. In: *Proceedings of 2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*. Madrid, Spain; 2021. P. 210–217. DOI: 10.1109/COMPSAC51774.2021.00039

16. Romero M., Estévez P.A. Outlier Detection based on Transformations for Astronomical Time Series. In: *Proceedings of 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Padua, Italy; 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892590

17. Zhang H., Li Z. Anomaly Detection Approach for Urban Sensing Based on Credibility and Time-Series Analysis Optimization Model. *IEEE Access*. 2019;7:49102–49110. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909967

18. León-López K.M., Mouret F., Arguello H., Tourneret J.-Y. Anomaly Detection and Classification in Multispectral Time Series Based on Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022;60:1–11. Art no. 5402311. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3101127

19. Li Y., Wang J., Liu X., Xian N., Xie C. DIM Moving Target Detection using Spatio-Temporal Anomaly Detection for Hyperspectral Image Sequences. In: *Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia, Spain; 2018. P. 7086–7089. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517601

20. Lee J., Jeon C.-R., Kang S.-J. Performance Comparison of Soiling Detection Using Anomaly Detection Methodology. In: *Proceedings of 2022 19th International SoC Design Conference (ISOCC)*. Gangneung-si, Korea, Republic of; 2022. P. 229–230. DOI: 10.1109/ISOCC56007.2022.10031428

21. Li S., Zhang K., Hao Q., Duan P., Kang X. Hyperspectral Anomaly Detection with Multi-scale Attribute and Edge-Preserving Filters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018;15(10):1605–1609. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2853705

22. Lee C., Kim J., Kang S.-J. Semi-supervised Anomaly Detection with Reinforcement Learning. In: *Proceedings of 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*. Phuket, Thailand; 2022. P. 933–936. DOI: 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9895028

23. Karim S.M.A., Ranjan N., Shah D. A Scalable Approach to Time Series Anomaly Detection & Failure Analysis for Industrial Systems. In: *Proceedings of 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. Las Vegas, NV, USA; 2020. P. 0678–0683. DOI: 10.1109/CCWC47524.2020.9031262

24. Suetin P.K. *Klassicheskie ortogonal'nye mnogochleny* [Classical orthogonal polynomials]. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2007. 480 p. (In Russ.)

25. Nikiforov A.F., Suslov S.K. *Klassicheskie ortogonal'nye polinomy* [Classical orthogonal polynomials]. Moscow: Znanie Publ.; 1985. 32 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Ефанов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; efanov@mail.ru.

Иванова Наталья Сергеевна, аспирант кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; ivanova@ugatu.su.

Разумов Владимир Геннадьевич, инженер-проектировщик, ООО «СИНТЕР», Челябинск, Россия; wisewolf7778@gmail.com.

Information about the authors

Vladimir N. Efanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Electronic Engineering, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, efanov@mail.ru.

Natalya S. Ivanova, Postgraduate student of the Department of Electronic Engineering, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; ivanova@ugatu.su.

Vladimir G. Razumov, Design engineer, LLC SINTER, Chelyabinsk, Russia; wisewolf7778@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 26.11.2023

The article was submitted 26.11.2023

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

Научная статья

УДК 31.35.51

DOI: 10.14529/ctcr240306

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТЕСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ СОБЫТИЙНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ ФАКТОРОВ

С.А. Баркалов¹, bsa610@yandex.ru

И.В. Чернов², chernov@ipu.ru

В.Р. Фейзов², vadimus150@gmail.com

¹ Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. В работе представлен сценарный подход к исследованию протестного потенциала в обществе с использованием математического аппарата теории графов и программного комплекса имитационного моделирования. **Цель.** Работа направлена на построение сценарно-когнитивной модели, отражающей ключевые факторы, такие как: уровень депривации населения, общее благополучие, социальные страхи, доверие к власти, социальные ожидания, стабильность социальных структур. **Материалы и методы.** В качестве метаматематического аппарата в проведенном исследовании используется модель функциональных ориентированных графов, которая, в свою очередь, является развитием классической когнитивной модели. При программной реализации для расчета э-сценариев поведения вершин применен метод линейного регрессионного анализа данных. **Результаты.** Приведены результаты сценарного исследования построенной модели, получены прогнозные сценарии динамики развития протестного потенциала общества при различных условиях и воздействиях. В основе исследования лежит изучение возможной реакции сложной системы на внешние деструктивные воздействия и предлагается комплекс мер по противодействию таким воздействиям на социальную динамику. Сценарная методология объединяет теорию графов для представления сложных взаимосвязей между ключевыми факторами и имитационное моделирование для прогнозирования возможных сценариев развития ситуации. Проведение подобного исследования связано с модификацией традиционного математического аппарата когнитивного моделирования. Разработаны методы и алгоритмы сценарно-событийной идентификации поведения значимых факторов модели, а также методы использования результатов такой идентификации при формировании сложных функциональных взаимосвязей в сценарной модели. При этом в процессе генерации сценариев значительно расширяется множество событий, которые при традиционном подходе к когнитивному моделированию могли быть упущены, но могут иметь ключевое значение для анализа ситуации. **Заключение.** Представленная в работе технология сценарного моделирования реализована в соответствующем программно-аналитическом комплексе, целью разработки которого является автоматизация процессов сценарного исследования социально-экономических и политических систем.

Ключевые слова: сценарный подход, теория графов, имитационное моделирование, управление протестным потенциалом, социальная динамика, внешнее деструктивное воздействие, меры противодействия, социальная стабильность, математическое моделирование

Для цитирования: Баркалов С.А., Чернов И.В., Фейзов В.Р. Сценарное моделирование протестного потенциала на основе событийной идентификации динамики факторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 67–81. DOI: 10.14529/ctcr240306

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240306

SCENARIO ANALYSIS OF PROTEST POTENTIAL BASED ON EVENT IDENTIFICATION OF THE DYNAMICS OF FACTORS

S.A. Barkalov¹, bsa610@yandex.ru
I.V. Chernov², chernov@ipu.ru
V.R. Feyzov², vadimus150@gmail.com

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. In this study, we present a scenario-based approach to investigate the protest potential in society using mathematical tools from graph theory and simulation modeling. **The research objective.** The research aims to construct a cognitive map that reflects key factors, such as population deprivation levels, overall well-being, social fears, trust in authority, social expectations, and stability of social structures. **Materials and methods.** The model of functional oriented graphs, which in turn is a development of the classical cognitive model, is used as a metamathematical apparatus in the study. In the software implementation, the method of linear regression data analysis was used to calculate e-scenarios for the behavior of vertices. **Results.** We report the results of a scenario analysis of the developed model, obtaining forecasted scenarios of the dynamics of society's protest potential under various conditions and influences. At the core of this research is the examination of a complex system's possible response to external destructive impacts, and we propose a set of measures to counteract these influences on societal dynamics. The scenario methodology combines graph theory for representing complex relationships between key factors and simulation modeling for predicting potential developmental scenarios. Conducting this study required modifying the traditional mathematical apparatus of cognitive modeling. We developed methods and algorithms for scenario-event identification of the model's significant factors' behavior and utilizing the results of such identification when forming complex functional relationships in the scenario model. In generating scenarios, the range of events is significantly expanded compared to traditional cognitive modeling approaches, which could have been overlooked but may be crucial for situational analysis. **Conclusion.** The scenario modeling technology presented in the work is implemented in the appropriate software and analytical complex, the purpose of which is to automate the processes of scenario research of socio-economic and political systems.

Keywords: scenario approach, graph theory, simulation modeling, protest potential management, social dynamics, external destructive influence, countermeasures, social stability, mathematical modeling

For citation: Barkalov S.A., Chernov I.V., Feyzov V.R. Scenario analysis of protest potential based on event identification of the dynamics of factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):67–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240306

Введение

Сложные социально-экономические системы, какими, безусловно, являются государства, требуют комплексного и многофакторного подхода в управлении всеми сферами деятельности. Сфера обеспечения безопасности государства тесно переплетается с экономической, политической и социальной сферой, но никак не ограничивается ими. Очевидным является тот факт, что для каждого объекта управления эти сферы будут иметь свои специфические отличия, которые будет затруднительно анализировать, если исследователь не является специалистом по конкретному региону или ситуации. Тем не менее общедоступная статистика и исторические данные предоставляют возможность выделить некоторые фундаментальные показатели, которые являются основой при формировании прогнозных моделей [1–3]. При анализе динамики таких показателей появляется возможность совершенствования принимаемых управленческих решений, в том числе в контексте превентивного противодействия внешним угрозам [4–6].

Использование имитационного моделирования, в основе которого лежит классический аппарат когнитивных карт, позволяет исследовать сложные процессы и учитывать множество факторов, однако при таком анализе часто теряется вариативность будущих состояний исследуемой системы. Для того чтобы учитывать и исследовать динамику модели, предлагается использовать

инструментарий сценарного анализа. Отличительным фактором сценарного анализа, который применяется во многих сферах от экономики до технологий и медицины, является возможность учитывать факторы, которые влияют на изменение состояний системы. Сценарный анализ позволяет учитывать факторы и зависимости, связанные с различными условиями и состояниями, в том числе неопределенностью, что позволяет работать в ситуации, когда на результат моделирования влияют факторы, изменяющиеся во времени или в зависимости от действий участников процесса [7–9]. Наиболее ярко сценарный подход проявляется в качестве инструмента стратегического планирования [10]. Сбор данных для формирования корректно построенной модели часто основывается на заключениях экспертов этой области, что позволяет оперировать экспертно-значимыми событиями и отбрасывать ненужные факторы и события.

В настоящее время накоплен значительный опыт решения широкого круга прикладных и практических задач в области сценарного анализа процессов организационного управления [11]. Одновременно с этим обобщение результатов практического применения сценарного подхода и когнитивного моделирования позволило выявить и ряд имеющихся технологических ограничений, в частности, не позволяющих в полной мере анализировать влияние динамики изменения значений ключевых факторов модели и (или) моментов смены характера данной динамики на исследуемые свойства и характеристики моделируемых процессов развития сложных объектов управления (социально-экономических, общественно-политических, информационных и иных систем), что неизбежно сказывается на качестве генерируемых сценариев и визуализации полученных результатов.

1. Методы событийной идентификации в сценарном анализе

В качестве метаматематического аппарата в проведенном исследовании используется модель функциональных ориентированных графов, которая, в свою очередь, является развитием классической когнитивной модели [12]. Структура модели задается ориентированным графом $G(X, E)$ с множеством вершин X и множеством дуг E . Кроме этого, модель дополнена следующими компонентами: множеством параметров вершин $V = \{ v_i, i \leq N = \|X\| \}$, т. е. каждый параметр $v_i \in V$ соответствует вершине x_i . Определяется также функционал преобразования взаимодействия между факторами модели в форме параметров дуг, в общем случае – это функция $f_{ij}(v_i, v_j)$, в частном случае – это или знак («+» или «-»), или вес ($+W_{ij}$ или $-W_{ij}$).

В работе приводится алгоритм идентификации типа динамики значимых факторов модели и использование его результатов в функциональных связях между факторами модели, а также для визуализации результатов моделирования. Приводится пример использования разработанного алгоритма при исследовании модели социальной стабильности.

Элементарный сценарий (э-сценарий) представляет собой базовую характеристику поведения вершины на конкретном временном интервале. Возможны следующие типы э-сценариев [13]: рост (тип 1), падение (тип 2), постоянно (тип 3), колебания вокруг постоянного значения (тип 4), расходящиеся колебания (тип 5), сходящиеся колебания (тип 6).

Расчет э-сценариев поведения вершин при программной реализации может определяться тремя основными параметрами: период, интервал и задержка. Их значения задаются пользователем и каждое из них представляет собой число шагов.

Период (p) задает периодичность расчета э-сценариев. Вычисления производятся на шагах, кратных периоду. При этом количество шагов, участвующих в расчете, зависит от заданного интервала (n). Задержка (d) сдвигает интервал на d шагов к началу моделирования.

Например, заданы следующие значения параметров: $p = 10$, $n = 6$, $d = 2$. Тогда расчет э-сценариев будет осуществляться на шагах 10, 20, 30 и т. д. При этом в вычислениях будут участвовать значения вершин на шагах 3–8, 13–18, 23–28 и т. д.

Э-сценарий рассчитывается алгоритмом для всего следующего за моментом расчета периода, т. е. каждая вершина на всех шагах следующего периода характеризуется одним э-сценарием.

При программной реализации для расчета э-сценариев поведения вершин применен метод линейного регрессионного анализа данных [14]. Этот метод позволяет аппроксимировать локальные максимумы и минимумы значений параметра вершины на рассматриваемом интервале, представив их в виде одной (монотонный рост или падение) или двух линий. По углу наклона этой линии или нескольких линий определяется тип э-сценария.

Исходными данными для каждой вершины является набор значений параметра i -й вершины v_i на шагах $[p - n - d + 1; p - d]$. Всего n значений. Сначала они приводятся к логарифмическому виду, при этом знак сохраняется:

$$y_i = \pm \ln(|v_i| + 1), \quad (1)$$

где v_i – значение параметра вершины, полученное в результате моделирования; y_i – значение вершины, приведенное к логарифмическому виду.

Рассчитываются математические ожидания значения вершины и количества шагов (времени) на рассматриваемом интервале:

$$M[y] = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2)$$

$$M[i] = \frac{\sum_{i=1}^n i}{n}. \quad (3)$$

Далее определяется дисперсия значений, дисперсия шагов и ковариация:

$$D[y] = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M[y])^2}{n}, \quad (4)$$

$$D[i] = \frac{\sum_{i=1}^n (i - M[i])^2}{n}, \quad (5)$$

$$\text{cov}(y, i) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M[y])(i - M[i])}{n}. \quad (6)$$

Уравнение линии регрессии представлено формулой

$$f(x) = b_0 + b_1 x, \quad (7)$$

где b_0 и b_1 – коэффициенты линии регрессии.

Коэффициент b_1 представляет собой коэффициент угла наклона линии регрессии Θ и вычисляется как отношение ковариации значений и шага к дисперсии шага:

$$b_1 = \Theta = \frac{\text{cov}(y, i)}{D[i]} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M[y])(i - M[i])}{\sum_{i=1}^n (i - M[i])^2}. \quad (8)$$

Коэффициент b_1 показывает, на сколько процентов изменится значение вершины с ростом шага.

Коэффициент b_0 рассчитывается по формуле

$$b_0 = M[y] - b_1 M[i]. \quad (9)$$

Для оценки качества полученного уравнения регрессии можно использовать коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = \left(\frac{\text{cov}(y, i)}{\sqrt{D[i] * D[y]}} \right)^2. \quad (10)$$

Коэффициент детерминации (R^2) отражает меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Таким образом он показывает, насколько хорошо подобрана регрессия. Коэффициент детерминации может принимать значения от 0 до 1. Если он равен 1, то все данные выстроены в линию и регрессия подобрана идеально. Следует отметить, что при анализе данных, полученных эмпирическим путем, граничные значения для R^2 практически невозможно достигнуть. Тем не менее если вводные данные для анализа являются итогами компьютерного моделирования, то их трудно считать случайными значениями. В таком случае проведенный регрессионный анализ можно рассматривать в качестве метода машинного обучения, направленного на классификацию тенденций значений входной последовательности. Исходя из этих соображений вполне вероятными являются случаи, когда в результате оценки регрессии значение коэффициента детерминации близко или равно единице. В качестве примера такого случая можно рассматривать строго растущую или строго убывающую динамику анализируемого фактора, полученную как результат моделирования сценария.

Реализованный алгоритм расчета э-сценариев предполагает два варианта анализа поведения вершин в зависимости от типа анализируемого процесса. Он может быть монотонным или содержащим колебания.

В качестве исходных данных анализа для выбранного диапазона изменения значения факторов используются точки локальных максимумов для построения верхней линии регрессии и ло-

кальных минимумов для построения нижней линия регрессии [13]. Подобный алгоритм выбора данных для регрессионного анализа позволяет в некоторой мере детализировать более общий метод применения фиктивных переменных для точек перегиба, поскольку формируется две выборки анализируемых данных: локальные максимумы и локальные минимумы. Затем две эти сформированные выборки отдельно оцениваются и определяются их тренды. Сопоставление результатов подобного оценивания, как будет видно далее, позволит определить тип динамики фактора. Таким образом, для расчетов нет необходимости оценивать всю изначальную выборку, полученную в результате моделирования.

Для определения типа процесса подсчитывается количество максимумов и минимумов на исследуемом интервале. Точка считается максимумом, если $y_i - y_{i-1} \geq 0$ и $y_{i+1} - y_i < 0$ и минимумом, если $y_i - y_{i-1} \leq 0$ и $y_{i+1} - y_i > 0$.

Если количество максимумов меньше или равно 1 или количество минимумов меньше или равно 1, то процесс считается монотонным. Иначе – колебательным.

Для монотонного процесса сценарий определяется исходя из рассчитанного коэффициента угла наклона линии регрессии (8). Если $\Theta > 0$, то сценарий представляет собой рост, без выраженных перегибов (тип 1). Если $\Theta < 0$ – падение (тип 2). Иначе – постоянное значение или колебания, ограниченные по амплитуде (тип 3).

Таким образом, в отличие от монотонного процесса, где используется одна линия регрессии, построенная по всем данным, для колебательного процесса необходимо провести две линии регрессии – по точкам максимумов и точкам минимумов (рис. 1).

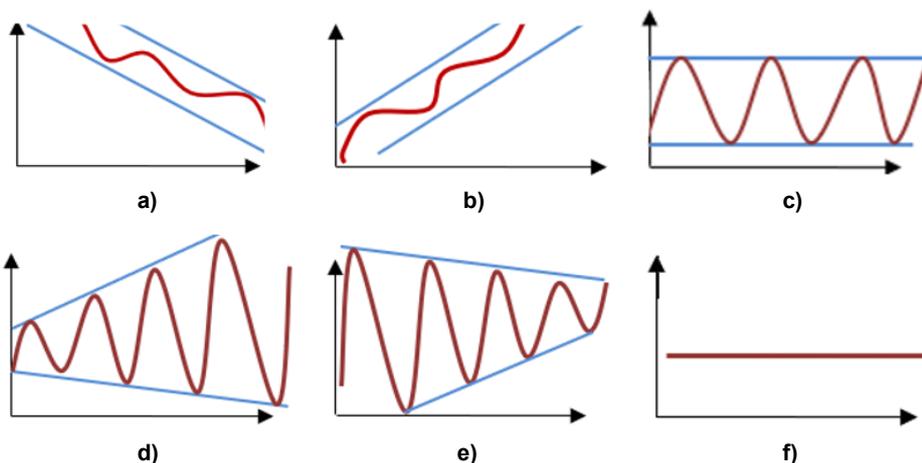


Рис. 1. Иллюстрация оценки колебательных процессов
Fig. 1. Illustration of the assessment of oscillatory processes

Предварительно необходимо внести корректировку в имеющиеся наборы максимумов и минимумов значений факторов. Подобная корректировка проводится с целью устранения случайных всплесков и заключается в том, что если имеется чередование знака максимумов, то в итоговый набор включаются только положительные максимумы. Аналогично, если есть чередование знака минимумов, то в итоговый набор данных для анализа включаются только отрицательные минимумы.

Принцип расчета коэффициентов для линий регрессии по максимумам и минимумам аналогичен представленному ранее (2)–(9).

В качестве исходных данных берется скорректированный набор значений максимумов y_{max} и набор порядковых номеров шагов в рамках интервала, на которых максимумы произошли s_{max} . Всего n_{max} значений в каждом наборе.

Далее считается математическое ожидание и дисперсия для каждого набора и их ковариация:

$$M[y_{max}] = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} y_{max i}}{n_{max}}, \quad (11)$$

$$M[s_{max}] = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} s_{max i}}{n_{max}}, \quad (12)$$

$$D[y_{max}] = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} (y_{max_i} - M[y_{max}])^2}{n_{max}}, \quad (13)$$

$$D[s_{max}] = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} (s_{max_i} - M[s_{max}])^2}{n_{max}}, \quad (14)$$

$$cov(y_{max}, s_{max}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} (y_{max_i} - M[y_{max}]) * (s_{max_i} - M[s_{max}])}{n_{max}}. \quad (15)$$

На основании полученных величин вычисляется коэффициент угла наклона линии регрессии по максимумам:

$$\Theta_{max} = \frac{cov(y_{max}, s_{max})}{D[s_{max}]} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{max}} (y_{max_i} - M[y_{max}]) * (s_{max_i} - M[s_{max}])}{\sum_{i=1}^{n_{max}} (s_{max_i} - M[s_{max}])^2}. \quad (16)$$

Подобным образом проводится расчет коэффициента угла наклона линии регрессии по минимумам.

Далее вводится понятие угла погрешности Θ_{err} . Если абсолютное значение коэффициента угла наклона линии регрессии меньше Θ_{err} , то он считается равным 0.

Для колебательного процесса определение элементарного сценария опирается на рассчитанные значения коэффициентов угла наклона линий регрессии по максимумам и по минимумам, а также на принятую погрешность.

Введем переменную Sc – тип э-сценария фактора на заданном интервале.

Если $\Theta_{max} > \Theta_{err}$ и $\Theta_{min} > \Theta_{err}$, то э-сценарий поведения фактора на интервале представляет собой рост (рис. 1a) монотонный или немонотонный, $Sc = 1$.

Иначе, если $\Theta_{max} < -1 * \Theta_{err}$ и $\Theta_{min} < -1 * \Theta_{err}$ (рис. 1b), то э-сценарий поведения фактора на интервале представляет собой падение монотонное или немонотонное, $Sc = 2$.

Иначе, если $|\Theta_{max}| \leq \Theta_{err}$ и $|\Theta_{min}| \leq \Theta_{err}$ (рис. 1c), то э-сценарий представляет собой колебания вокруг постоянного значения (рис. 1c), ($Sc = 4$).

Иначе если $\Theta_{max} > 0$ и $\Theta_{min} < 0$ и $\left| \frac{\Theta_{max}}{\Theta_{min}} - 1 \right| > \Theta_{err}$ (рис. 1d), то сценарий представляет собой расходящиеся колебания ($Sc = 5$).

Иначе если $\Theta_{min} < 0$ и $\Theta_{min} > 0$ и $\left| \frac{\Theta_{max}}{\Theta_{min}} - 1 \right| > \Theta_{err}$ (рис. 1e), то э-сценарий представляет собой сходящиеся колебания ($Sc = 6$).

Иначе, как показано на рис. 1e и рис. 1f, – постоянное значение (см. рис. 1f), $Sc = 3$.

Переменные э-сценариев факторов Sc могут использоваться в качестве аргументов функция весов дуг. Кроме того, в процессе вычисления э-сценариев факторов можно также определять значения интервала времени (в шагах моделирования), на котором сохраняется текущий тип э-сценария (TS) и долю реализации k -го типа э-сценария за все прошедшее время моделирования (Dol) [13].

Например, пусть имеется модель протестной активности (рис. 2). Одной из причин роста протестной активности (фактор 1) может являться снижение качество жизни населения (фактор 6), причем не одномоментные колебания этого фактора, а относительно долговременные тенденции и имеющие негативную историю в прошлом, что вполне соответствует реальности [13]. К тому же будем полагать, что строго негативные тенденции оказывают влияние на протестную активность намного сильнее, чем прочие. Поэтому вполне обоснованно сформировать функционал одной из связей между этими моделями на основе идентификации э-сценариев. Тогда вес дуги $D_{1,6}$ мог бы быть, например, таким [13]:

$$D_{1,6} = if(SC_6 = 1 \text{ and } TS_6 = 11 \text{ and } DOL_6(2) > 30, 2 * I_6, 0), \quad (17)$$

что означает следующее: если изменение параметра вершины 6 является ростом ($SC_6 = 1$) и такая динамика сохранялась на протяжении 11 шагов моделирования ($TS_6 = 11$), причем эта же динамика в совокупности имела место более чем в течении 30 % всего прошедшего времени моделирования ($DOL_6(2) > 30$), то по дуге $D_{1,6}$ в каждый момент времени проходит импульс, равный $2 * I_6$. Если динамика параметра иная, то влияние ничтожно и импульс не проходит, что фактически означает разрыв дуги. Это лишь простой пример применения новых переменных в функциональных взаимосвязях. Безусловно, можно выстроить ряд вложенных логических выражений, отрабатывающих более сложные ситуации.

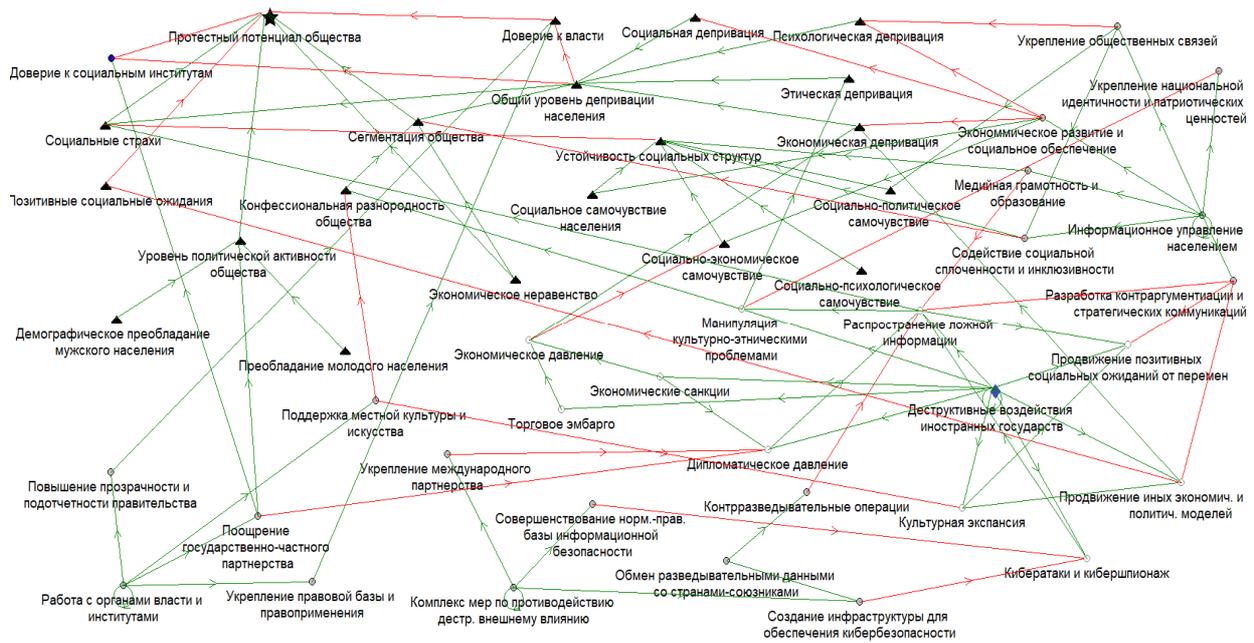


Рис. 2. Общая сценарная модель паспорта протестного потенциала
Fig. 2. General scenario model of the protest potential passport

2. Моделирование сценариев

Сценарием является последовательность экспертно-значимых событий, т. е. таких событий, важность которых для анализа поведения объекта управления и для принятия управленческих решений определяются специалистами в моделируемой предметной области. В данной модели экспертно-значимое событие определяется динамикой пяти выделенных факторов:

- 1) протестный потенциал общества;
- 2) комплекс мер по противодействию деструктивному внешнему влиянию;
- 3) устойчивость социальных структур;
- 4) общий уровень депривации населения;
- 5) сегментация общества.

Изменение расчетного значения динамики (SC_i) любого из этих 5 факторов означает появление нового события. Как показали результаты сценарного исследования сформированной модели, все выделенные факторы имели только 4 типа динамики: рост, падение, постоянное значение, расходящиеся колебания (неустойчивость).

В модели учитывались три основные группы факторов: факторы, связанные с базовым слоем модели, или факторы, влияющие на протестный потенциал исследуемой страны; факторы, связанные с внешним деструктивным воздействием; факторы, связанные с противодействиями такого рода вызовам. Модель представляет собой наиболее репрезентативный пример стратегического уровня планирования, который учитывает факторы, связанные с многими сферами деятельности объекта управления (страны) одновременно. Обуславливается это тем, что общество, которое и образует страну и без которого государство не могло бы функционировать, вовлечено во многие сферы деятельности. Столь повсеместное вовлечение в деятельность позволяет не только определить соответствующие общие характеристики модели, но и выделить уязвимые места, которые необходимо учитывать для обеспечения устойчивого функционирования системы.

2.1. Сценарий противодействия

Результат моделирования первого сценария, поведение факторов модели без противодействия внешним угрозам представлены на рис. 3.

Как показывают результаты моделирования, целевой фактор модели «Протестный потенциал общества» показывает возрастающую динамику параллельно с ослаблением фактора «Сегментация общества», что, в свою очередь, сигнализирует о том, что при активизации деструктивного воздействия результаты моделирования неудовлетворительны и необходимо подключать факторы управления ситуацией.

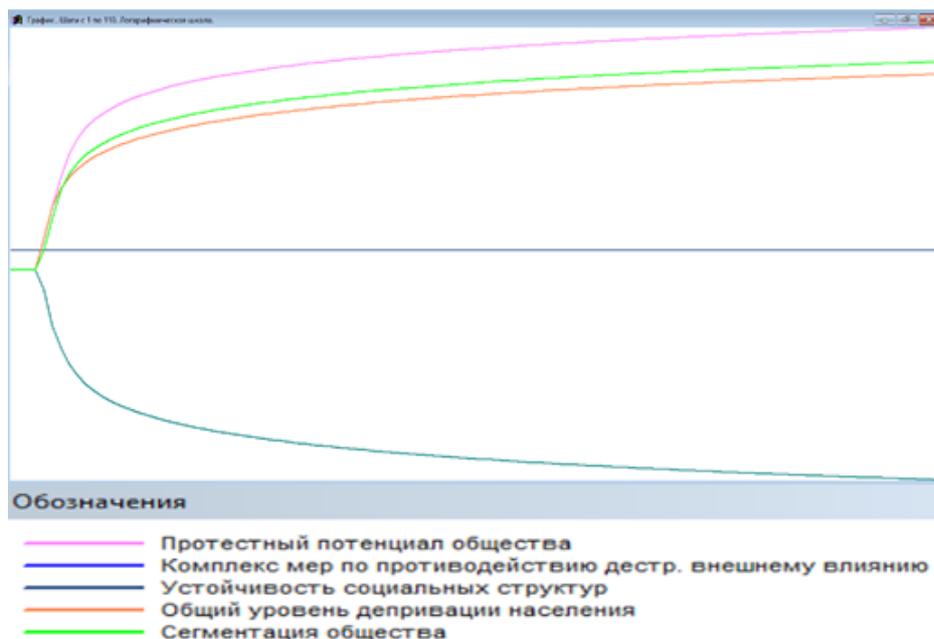


Рис. 3. Сценарий отсутствия противодействия
Fig. 3. Scenario of counteraction absence

2.2. Сценарий упреждающего противодействия

Моделирование, как и в предыдущем случае, происходит при активации деструктивных воздействий, связанных с фактором «Деструктивное влияние иностранных государств». При этом активируется весь комплекс мероприятий, связанных с этой вершиной. Комплекс подобных воздействий включает различные факторы, связанные с управлением в сфере экономики, культурной и политической экспансией, а также проводимые кибератаки и компании по дезинформации. Следует отметить, что факторы модели являются информационными, т. е. под ними надо понимать их восприятие социумом, а не какие-либо числовые характеристики.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования в графической и по-событийной форме соответственно.

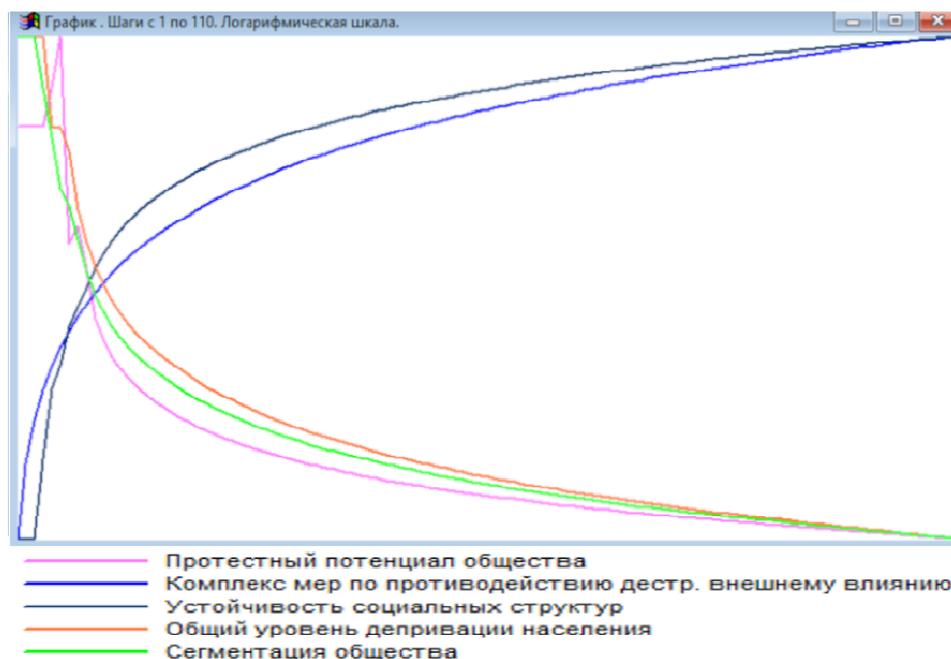


Рис. 4. Сценарий упреждающего противодействия
Fig. 4. Scenario of proactive counteraction

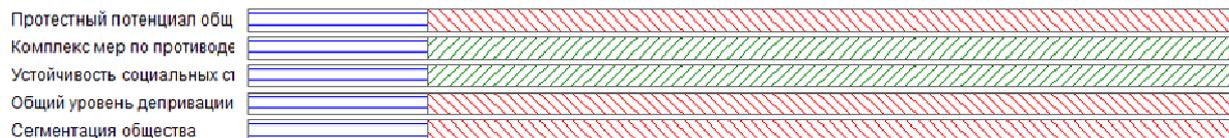


Рис. 5. Событийная динамика поведения факторов второго сценария
Fig. 5. Event dynamics of factor behavior in the second scenario

Для представления результатов моделирования в сценарной, по-событийной форме используются обозначения, представленные в табл. 1.

Обозначения факторной динамики
Designations of factor dynamics

Таблица 1
Table 1

Индикация динамики	Тип динамики	Sc_i
	Рост	1
	Падение	2
	Постоянное значение	3
	Неустойчивость (расходящиеся колебания)	4

Первое событие соответствует периоду времени, когда тенденции по приведенному выше алгоритму еще не рассчитаны, поскольку не прошло необходимое количество начальных шагов моделирования (для этой модели интервал шагов, по которым определяются тенденции, $TS_i = 20$).

Второе событие, описание которого представлено в нижней части рис. 5. имеет следующее содержание: наблюдается снижение протестного потенциала на фоне усиления мер противодействия деструктивным явлениям. При этом уменьшается уровень депривации населения, что отрицательно влияет и на сегментацию общества, и на консолидацию населения, одновременно с усилением факторов управления возрастает стабильность социальных структур. Появление этого события связано с комплексным влиянием вершины «Информационный контроль общества», что в совокупности влияет на цель моделирования, и как результат – наблюдается снижение протестного потенциала общества.

При дальнейшем моделировании новых событий в сценарии не появляется. Таким образом, при упреждающем противодействии деструктивным воздействиям удастся сохранить социальную стабильность общества посредством превентивной активации влияния факторов: «Информационный контроль общества», «Противодействие деструктивному иностранному влиянию» и «Работа с государственными органами и учреждениями». Здесь следует отметить, что каждое из этих направлений реализации управления направлено на определенное воздействие не только с базовым слоем модели, но и факторами, связанными непосредственно с внешним влиянием. Так, например, фактор «Противодействие деструктивному иностранному влиянию» активирует вершину «Укрепление международного партнерства», которая позволяет уменьшить дипломатическое давление на страну.

2.3. Сценарий противодействия с задержкой

Формирование следующего сценария (рис. 6) осуществляется также при активации фактора «Деструктивное влияние иностранных государств» и при аналогичном предыдущему сценарию противодействию. Отличие состоит лишь в том, что в этом случае факторы, связанные с противодействием, активируются с запозданием по времени, т. е. когда деструктивные процессы уже проникли в социум.

Как видно из полученных результатов (см. рис. 6), к эффективности данного управленческого решения можно относиться скептически, так как анализ сценария в по-событийной форме (рис. 7) показывает, что успех достигается лишь в краткосрочном периоде.

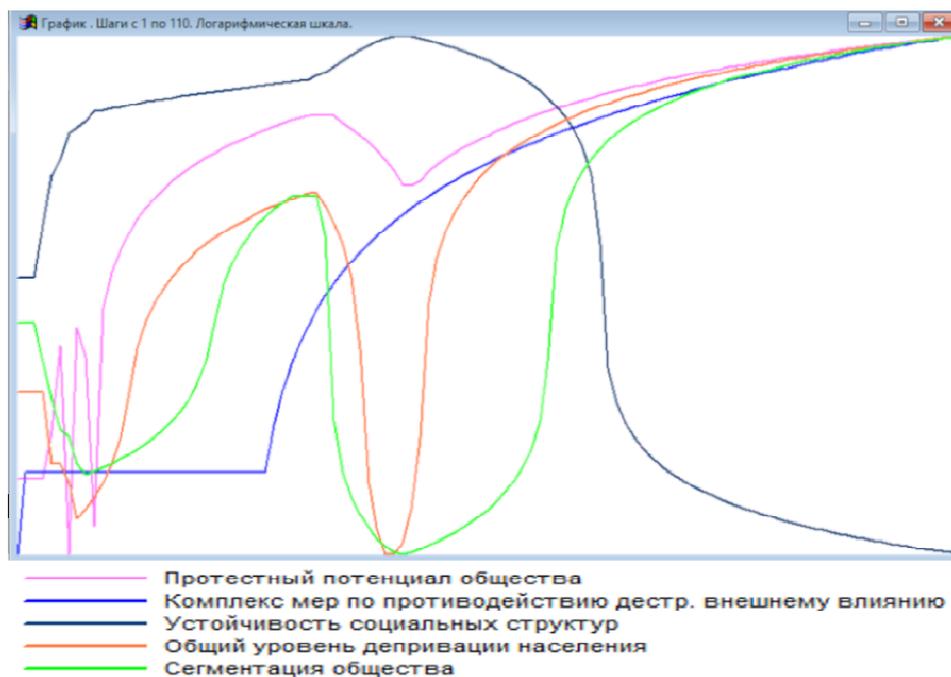


Рис. 6. Сценарий противодействия с задержкой
Fig. 6. Scenario of counteraction with delay

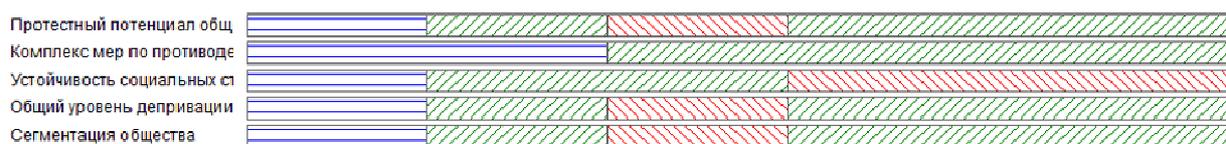


Рис. 7. Событийная динамика поведения факторов третьего сценария
Fig. 7. Event dynamics of factors in the third scenario

Полученный при моделировании сценарий состоит из нескольких последовательных событий, описания которых в форме э-сценария представлены в табл. 2.

События сценария

Таблица 2

Scenario Events

Table 2

№ события	Шаги моделирования		Динамика факторов	Изменения, инициирующие события
1	1	20	Не определены типы динамики факторов	
2	21	40	«ПРОТЕСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЩЕСТВА» – РАСТЁТ. «Комплекс мер по противодействию деструктивному внешнему влиянию» – постоянно. «УСТОЙЧИВОСТЬ СОЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР» – РАСТЕТ. «ОБЩИЙ УРОВЕНЬ ДЕПРИВАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ» – РАСТЁТ. «СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЩЕСТВА» – РАСТЁТ. «Протестный потенциал общества» – растёт.	«Протестный потенциал общества» – растёт. «Устойчивость социальных структур» – растёт. «Общий уровень депривации населения» – растёт. «Сегментация общества» – растёт. «Протестный потенциал общества» – растёт. «Устойчивость социальных структур» – растёт.

Окончание табл. 2
Table 2 (end)

№ события	Шаги моделирования		Динамика факторов	Изменения, инициирующие события
			<p>«Меры противодействия деструктивному иностранному влиянию» – постоянно.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – растет.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – растет.</p> <p>«Сегментация общества» – растет.</p>	<p>«Общий уровень депривации населения» – растет.</p> <p>«Сегментация общества» – растет</p>
3	41	60	<p>«ПРОТЕСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЩЕСТВА» – УМЕНЬШАЕТСЯ.</p> <p>«КОМПЛЕКС МЕР ПО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ ДЕСТРУКТИВНОМУ ВНЕШНЕМУ ВЛИЯНИЮ» – РАСТЁТ.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – растет.</p> <p>«ОБЩИЙ УРОВЕНЬ ДЕПРИВАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ» – УМЕНЬШАЕТСЯ.</p> <p>«СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЩЕСТВА» – УМЕНЬШАЕТСЯ.</p> <p>«Протестный потенциал общества» – падает.</p> <p>«Меры противодействия деструктивному иностранному влиянию» – растет.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – растет.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – падает.</p> <p>«Сегментация общества» – падает</p>	<p>«Протестный потенциал общества» – падает.</p> <p>«Комплекс мер по противодействию деструктивному внешнему влиянию» – растёт.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – падает.</p> <p>«Сегментация общества» – падает.</p> <p>«Протестный потенциал общества» – падает.</p> <p>«Меры противодействия деструктивному иностранному влиянию» – растет.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – падает.</p> <p>«Сегментация общества» – падает</p>
4	61	110	<p>«ПРОТЕСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЩЕСТВА» – РАСТЁТ.</p> <p>«Комплекс мер по противодействию деструктивному внешнему влиянию» – растёт.</p> <p>«УСТОЙЧИВОСТЬ СОЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР» – УМЕНЬШАЕТСЯ.</p> <p>«ОБЩИЙ УРОВЕНЬ ДЕПРИВАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ» – РАСТЁТ.</p> <p>«СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЩЕСТВА» – РАСТЁТ.</p> <p>Протестный потенциал общества» – растет.</p> <p>«Меры противодействия деструктивному иностранному влиянию» – растет.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – падает.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – растет.</p> <p>«Сегментация общества» – растет</p>	<p>«Протестный потенциал общества» – растёт.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – падает.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – растёт.</p> <p>«Сегментация общества» – растёт.</p> <p>«Протестный потенциал общества» – растет.</p> <p>«Устойчивость социальных структур» – падает.</p> <p>«Общий уровень депривации населения» – растет.</p> <p>«Сегментация общества» – растет</p>

Анализ результатов моделирования показал, что в целом сценарий отрицательный. Запоздавшая реакция при принятии мер противодействия деструктивным процессам вызвала в полученном сценарии лишь одно кратковременное (на протяжении 20 шагов моделирования) положительное событие (событие № 3 в табл. 2), связанное с активацией мер противодействия. Однако накопленные деструктивные тенденции переломили сценарий и следующее событие (событие № 4 в табл. 2) резко негативное, причем других событий в сценарии не появляется, и моделируемая система входит в финальное состояние.

2.4. Сценарий – «Упреждающее кратковременное противодействие»

Следующий сценарий описывает состояние факторов, при котором факторы внутреннего управления социальной стабильностью активизировались заблаговременно, тем не менее в связи с непостоянным воздействием, выраженным в отсутствии поддержки управленческих решений на всем временном интервале моделирования, добиться положительных результатов не удалось (рис. 8).

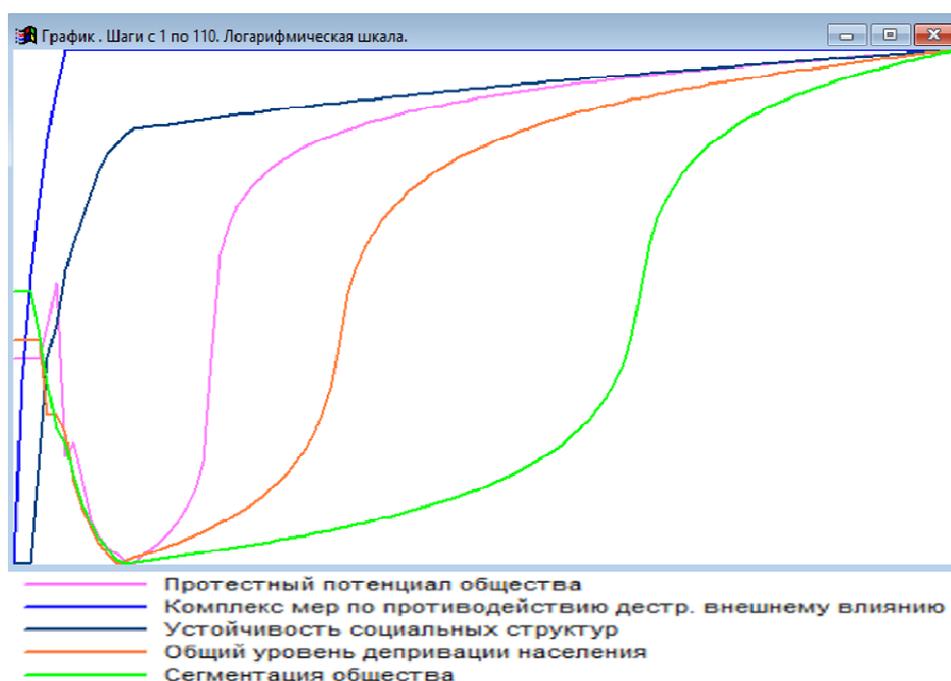


Рис. 8. Сценарий упреждающего краткосрочного противодействия
Fig. 8. Scenario of proactive short-term counteraction

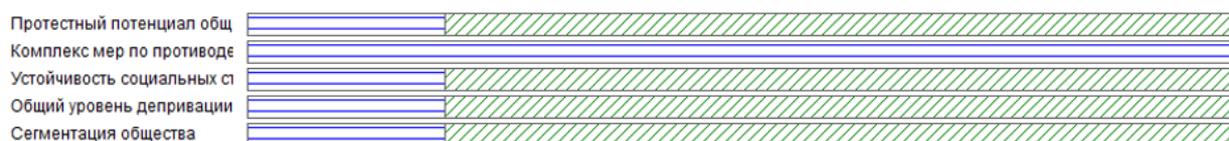


Рис. 9. Событийная динамика поведения факторов
Fig. 9. Event dynamics of factor behavior

В полученном сценарии (рис. 9) единственное рассчитанное событие (событие № 2) оказывается в целом положительным, и оно соответствует финальному состоянию моделируемой системы. Однако в отличие от положительных тенденций сценария 2 здесь наблюдается рост сегментации общества, что в дальнейшем и при новых условиях способно стать угрозой социальной стабильности.

Заключение

Представленная в работе технология сценарного моделирования реализована в соответствующем программно-аналитическом комплексе [15], целью разработки которого является автоматизация процессов сценарного исследования социально-экономических и политических систем.

Практическая апробация предложенного подхода к расширению моделирующих возможностей, а именно сценарной идентификации поведения факторов модели, показала высокую эффективность в процессе сценарного исследования сложных моделей социально-экономических систем. Применение предложенного подхода и алгоритма сценарно-событийной идентификации позволяет реализовывать механизм событийных функциональных взаимосвязей между факторами модели, в частности многослойного (в том числе – иерархического) представления структуры мультимодели, что обеспечивает возможность эффективного применения знаний экспертов в различных предметных областях на стадиях разработки и исследования процессов развития социально-экономических и политических систем [13].

Программная реализация разработанного алгоритма позволила повысить качество визуализации результатов моделирования за счет возможности представления текста сценария в терминах предметной области. Кроме того, появилась возможность передачи текущих аналитических данных моделирования в режиме реального времени в сторонние программные комплексы [13] в рамках комплексной системы поддержки принятия решений.

Приведенные в качестве примера модель и сценарии являются репрезентативными и показательными в контексте использования сценарного анализа для исследования сложных систем. Результаты исследования показали, что наиболее эффективным является сценарий, при котором превентивные меры оказали наибольший положительный результат на целевой фактор модели. Приведенные в работе примеры показали высокую значимость сценарного анализа и прогнозирования при управлении сложными системами

Список литературы

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. 584 с.
2. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability // CEUR Workshop Proceedings. Leipzig, 2018. Vol. 2093. P. 1–12.
3. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 456 с.
4. Enaleev A., Novikov D. Sustainable Control of Active Systems: Decentralization and Incentive Compatibility // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54 (13). P. 13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.410
5. Novikov D.A. Bounded Rationality and Control // Automation and Remote Control. 2022. Vol. 83, no. 6. P. 990–1009. DOI: 10.1134/S0005117922060145
6. Kulba V., Somov S. Placing replicas of data arrays in dynamic distributed systems // 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). Moscow, Russian Federation, 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD52249.2021.9600197
7. Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б. Методы сценарного планирования в организационном управлении // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXXI международной конференции. Москва, 2023. С. 32–41. DOI: 10.25728/iccss.2023.67.22.003
8. Сценарный анализ в управлении геополитическим и информационным противоборством / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков, И.В. Чернов; Центр исслед. проблем безопасности РАН. М.: Наука, 2015. 542 с.
9. Теория и практика имитационного моделирования при управлении: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.Е. Белоусов и др. Воронеж, 2009. 372 с.
10. Методы и способы сценарного управления инвестиционно-строительными комплексами регионов России: моногр. / Н.В. Агафонкина, С.А. Баркалов, В.Е. Белоусов, И.С. Суровцев. Воронеж: Научная книга, 2014. 424 с.
11. Управление развитием региона. Моделирование возможностей / О.И. Дранко, Д.А. Новиков, А.Н. Райков, И.В. Чернов. М.: URSS; ООО «ЛЕНАНД», 2023. 432 с.
12. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2 кн. / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, Д.А. Кононов и др. М.: Наука, 2012. Кн. 1. 304 с.
13. Чернов И.В. Сценарно-когнитивное моделирование сложных систем на основе событийной идентификации динамики факторов // Проблемы управления. 2023. № 3. С. 65–76.

14. Jeffrey M. Wooldridge, *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. Publisher South Western, Cengage Learning; 2019.

15. Чернов И.В. Повышение эффективности управленческих решений на основе использования программно-аналитического комплекса сценарного анализа и прогнозирования // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2018. № 1 (11). С. 40–57. DOI: 10.28995/2073-6304-2018-1-40-57

References

1. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: Psychological and Social Institute; 2005. 584 p. (In Russ.)

2. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability. In: *CEUR Workshop Proceedings*. Leipzig; 2018. Vol. 2093. P. 1–12.

3. Loginovskiy O.V., Gollai A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografiya* [Effective management of organizational and production structures: monograph]. Moscow: Infra-M; 2020. 456 p. (In Russ.)

4. Enaleev A., Novikov D. Sustainable Control of Active Systems: Decentralization and Incentive Compatibility. *IFAC-PapersOnLine*. 2021;54(13):13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.410

5. Novikov D.A. Bounded Rationality and Control. *Automation and Remote Control*. 2022;83(6):990–1009. DOI: 10.1134/S0005117922060145

6. Kulba V., Somov S. Placing replicas of data arrays in dynamic distributed systems. In: *2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD)*. Moscow, Russian Federation, 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD52249.2021.9600197

7. Shultz V.L., Kulba V.V., Shelkov A.B. [Methods of scenario planning in organizational management]. In: *Problems of Security Management of Complex Systems. Materials of the XXXI International Conference*. Moscow; 2023. P. 32–41. (In Russ.) DOI: 10.25728/icss.2023.67.22.003

8. Shultz V.L., Kulba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Stsenarnyy analiz v upravlenii geopoliticheskim i informatsionnym protivoborstvom* [Scenario analysis in the management of geopolitical and information warfare]. Moscow: Nauka; 2015. 542 p. (In Russ.)

9. Barkalov S.A., Belousov V.E. et al. *Teoriya i praktika imitatsionnogo modelirovaniya pri upravlenii: uchebnoe posobie* [Theory and practice of simulation modeling in management. Textbook]. Voronezh; 2009. 372 p. (In Russ.)

10. Agafonkina N.V., Barkalov S.A., Belousov V.E., Surovtsev I.S. *Metody i sposoby stsenarnogo upravleniya investitsionno-stroitel'nymi kompleksami regionov Rossii: monografiya* [Methods and methods for scenario management of investment and construction complexes in Russian regions. Monograph]. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2014. 424 p. (In Russ.)

11. Dranko O.I., Novikov D.A., Raykov A.N., Chernov I.V. *Upravlenie razvitiem regiona. Modelirovanie vozmozhnostey* [Regional development management. Possibility modeling]. Moscow: URSS, LENAND LLC; 2023. 432 p. (In Russ.)

12. Shultz V.L., Kulba V.V., Kononov D.A., Kosyachenko S.A., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Modeli i metody analiza i sinteza stsenariiev razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: v 2 kn.* [Models and methods of analysis and synthesis of scenarios for the development of socio-economic systems: in 2 books]. Moscow: Nauka; 2012. Book 1. 304 p. (In Russ.)

13. Chernov, I.V., Scenario-Cognitive Modeling of Complex Systems Based on Event-Driven Identification of Factor Dynamics. *Control Sciences*. 2023;(3):55–64. DOI: 10.25728/cs.2023.3.5

14. Jeffrey M. Wooldridge, *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. Publisher South Western, Cengage Learning; 2019.

15. Chernov I.V. Increase of the administrative decisions efficiency by using the software-analytical complex of scenario analysis and forecasting. *RSUH / RGGU bulletin. Series: Economics. Management. Law*. 2018;1(11):40–57. (In Russ.)

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Чернов Игорь Викторович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатория 20, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; chernov@ipu.ru.

Фейзов Вадим Рустамович, младший научный сотрудник, Лаборатория 20, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; vadimus150@gmail.com.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Igor V. Chernov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory 20, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; chernov@ipu.ru.

Vadim R. Feyzov, Junior Researcher, Laboratory 20, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; vadimus150@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 14.04.2024

The article was submitted 14.04.2024

МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Д.В. Гилёв¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

О.В. Логиновский², loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье анализируется модель прогнозирования финансово-экономического состояния, рассматривается возможность её трансформации для управления развитием учреждений медицинской отрасли, приводится соответствующая модификация при помощи использования методов дискриминантного анализа и математического программирования. Сформулированная модификация модели имеет чёткое математическое обоснование, позволяющее, с одной стороны, доказать её справедливость, а с другой стороны, конструктивно показывает возможность её использования с учётом специфики медицинской отрасли. **Цель исследования.** Целью данной работы является проработка изменений модели прогнозирования финансово-экономического состояния с учётом особенностей отрасли, а также оценка применения методов дискриминантного анализа, сведения их к задаче математического программирования, ограничения которой приводятся к системам линейных неравенств, получаемых с помощью построения максимально совместных подсистем. **Материалы и методы.** Предлагается использовать метод дискриминантного анализа с расширяемыми прецедентными множествами. Предполагается, что для улучшения качества решения этой задачи привлекаются суждения экспертов об объектах, вначале не вошедших в обучающую выборку. При этом ставится цель – определить наилучшие объекты для привлечения их в материал обучения с тем, чтобы максимально улучшить решение задачи. Для формализации модели на базе прогнозных значений зашифруем в вектор состояний все имеющиеся данные. Рассмотренные методы показывают свою результативность. **Результаты исследования.** В ходе модификации модели экономико-финансового состояния делается вывод о линеаризации модели, что связано и с операцией дифференцирования. Также демонстрируется возможность использования нейронных сетей речь для случая дифференцирования сложных функций, а в случае выпуклого программирования – о маргинальных оценках, получаемых с помощью операции дифференцирования по направлению. **Заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что использование строгого математического инструментария, модифицированная модель экономико-финансового состояния для медицинской отрасли является простой в использовании для управления развитием, так как может быть реализована как некоторый компонент компьютерной программы (нейронной сети), в который администратор вводит данные, а на выходе получает обработанный результат.

Ключевые слова: экономико-финансовое состояние, управление, дискриминантный анализ, математическое программирование, нейронные сети

Для цитирования: Гилёв Д.В., Логиновский О.В. Модификация модели прогнозирования финансово-экономического состояния для задачи управления развитием медицинских учреждений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 82–89. DOI: 10.14529/ctcr240307

MODIFICATION OF THE FINANCIAL AND ECONOMIC FORECASTING MODEL FOR THE TASK OF MANAGING THE DEVELOPMENT OF MEDICAL INSTITUTIONS

D.V. Gilev¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

O.V. Loginovskiy², loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article analyzes the model of forecasting the financial and economic condition, considers the possibility of its transformation for managing the development of medical institutions, and provides an appropriate modification using methods of discriminant analysis and mathematical programming. The formulated modification of the model has a clear mathematical justification, which allows, on the one hand, to prove its validity, and on the other hand constructively shows the possibility of its use, taking into account the specifics of the medical industry. **The purpose of the work.** The purpose of this work is to study changes in the forecasting model of the financial and economic condition, taking into account the specifics of the industry, as well as to evaluate the application of methods of discriminant analysis, reducing them to a mathematical programming problem, the limitations of which are reduced to systems of linear inequalities obtained by building maximally joint subsystems. **Materials and methods.** It is proposed to use the method of discriminant analysis with extensible precedent sets. It is assumed that in order to improve the quality of solving this problem, expert judgments about objects that were not initially included in the training sample are involved. At the same time, the goal is to determine the best objects to involve them in the learning material in order to maximize the solution of the problem. To formalize the model based on the predicted values, we will encrypt all available data into a vector of states. The considered methods show their effectiveness. **The results of the study.** During the modification of the economic and financial condition model, a conclusion is made about the linearization of the model, which is also associated with the differentiation operation. The possibility of using neural networks is also demonstrated for the case of differentiation of complex functions, and in the case of convex programming, for marginal estimates obtained using the directional differentiation operation. **Conclusion.** The results obtained allow us to assert that the use of strict mathematical tools, a modified model of the economic and financial condition for the medical industry is easy to use for development management, since it can be implemented as some component of a computer program (neural network) into which the administrator enters data, and at the output receives a processed result.

Keywords: economic and financial condition, management, discriminant analysis, mathematical programming, neural networks

For citation: Gilev D.V., Loginovskiy O.V. Modification of the financial and economic forecasting model for the task of managing the development of medical institutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):82–89. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240307

Введение

Финансово-экономическое развитие любого предприятия или организации – важнейшая задача в современных условиях бизнеса. При этом главенствующими проблемами управления организационными структурами в последние годы встают те вызовы, перед которыми оказывается наша страна. Обособленно стоит обратить внимание не только на оборонный, промышленный комплекс, но и на медицинскую сферу, так как она играет важнейшую роль и при управлении ею должны быть учтены и социально-экономическая нестабильность, и военно-политическая обстановка. При этом если модели прогнозирования финансово-экономического состояния промышленного предприятия уже хорошо известны и имеются описания их использования для управления развитием компаний, то для медицинских учреждений требуются их модификация и детальная проработка [1]. В последнее время возрастает потребность в медицинских услугах на всех уровнях, при этом недостаток финансирования ощущается всё чаще, а новых вливаний в медицину подчас взять неоткуда. В связи с этим медицинские учреждения вынуждены планировать

и выстраивать все процессы оказания медицинской помощи, начиная от формулировки финансовых запросов [2], заканчивая осуществлением функцией социальной взаимопомощи [3]. При этом нельзя забывать, что медицинская деятельность является социально-ориентированной, поэтому и оценка состояния медицинского учреждения, да и всей отрасли в целом, не может быть определена только с помощью набора бухгалтерских и экономических показателей [4].

В настоящей статье обсуждается модель оценки состояния медицинского учреждения не только с финансовой точки зрения, но и всеобъемлюще, учитывая все аспекты, связанные с управлением развития отрасли в целом и с учётом всех возникающих внешних вызовов.

1. Обзор литературы

Хорошо известна и описана модель прогнозирования финансово-экономического состояния предприятия [5], которая связывает оценочные балансовые показатели и отчётные доходы и расходы. Так, предлагается описать модель баланса предприятия через множество некоторых балансовых статей:

$$B = \{FA, CF, CL, D, Eq\},$$

где FA – внеоборотные активы;

CA – оборотные активы;

CL – текущие пассивы;

D – кредиты;

Eq – собственный капитал.

Аналогично описывается модель об отчётах доходов и расходах.

Такая структура моделей прогнозирования финансового состояния имеет свою действенность, однако никак не учитывает специфику медицинской отрасли. Нельзя в таком случае учитывать только сухие цифры, необходимо увязывать также показатели, связанные с социальной составляющей, которую условно можно назвать «сбережением здоровья и жизни пациентов».

Нами ранее уже предлагалась формализация модели финансового состояния медицинского учреждения в [6–8], сейчас же мы предлагаем её модификацию с учётом модели прогнозирования баланса при помощи отчёта о прибыли и убытках, а также с использованием математического моделирования.

Математическое моделирование позволяет использовать поиск закономерностей в материале наблюдений для решения задач мониторинга сложных систем, задач планирования и управления [9]. Существенны понятия выбора вариантов, обмена, диагностики и прогнозирования [10]. При этом обнаруживаются глубинные скрытые закономерности. Вообще рассматриваемые экономико-математические модели разделяются на две группы. В одну из них входят модели, служащие для исследования общих качественных свойств организационных систем. Коэффициенты, параметры и признаки объектов в таких моделях не обязательно оценивать по эмпирическим данным. Например, когда речь идет об улавливании эффектов обмена между большим числом подсистем. Это собственно относится к экономической теории. Во вторую группу входят модели, в которых коэффициенты зависимостей поддаются их идентификации по эмпирическим данным, по наблюдениям. Имеются модели двойственности (описывающие некоторые стороны фактического равновесия) в задачах управления, в общих моделях выбора и диагностики применительно к сложным системам. В работах [11, 12] построена общая схема двойственности, объединяющая конструкции для задач оптимизации, исследования операций и распознавания образов. При этом модель двойственности использует аналоги функции Лагранжа. При этом от простых моделей приходится переходить к сложным. Простые модели – с линейными связями, с аддитивностью отклика на факторы, с небольшим числом факторов, статические, детерминистские, с возможностью аналитического решения. Сложные модели – с нелинейными связями, с неаддитивностью откликов, с большим числом переменных, динамические и вероятностные, с компьютерной симуляцией вместо аналитического решения.

Имеются различные математические модели [13, 14], каждая из которых выделяет свои особые определенные стороны экономической и управленческой деятельности:

- достижение равновесия или сбалансированной динамики через конкурентный рынок;
- равновесие через коллективные договоры;
- принцип прецедентности и обучение диагностике ситуаций принятия решений.

2. Материалы и методы

Для формализации модели на базе прогнозных значений зашифруем в вектор состояний все имеющиеся данные, а именно такие, как: внеоборотные активы, оборотные активы, текущие пассивы, кредиты, собственный капитал, данные из отчётов о расходах и доходах, а также включим неформальные признаки, такие как количество вылечившихся пациентов, количество жалоб и т. д.

В такой постановке можно говорить о задаче дискриминантного анализа с расширяемыми прецедентными множествами. Предполагается, что для улучшения качества решения этой задачи привлекаются суждения экспертов об объектах, вначале не вошедших в обучающую выборку. При этом ставится цель – определить наилучшие объекты для привлечения их в материал обучения с тем, чтобы максимально улучшить решение задачи [15].

Определим эту задачу формально. Пусть имеются два аффинно-разделимых конечных множества A и B в пространстве R^n . Это представители двух классов, потенциально бесконечных размерностей, однако они могут быть как счётными, так и несчётными. Для наших целей мы можем использовать конечную структуру, так как для бесконечного случая всё будет описываться аналогичным образом.

Решаем задачу дискриминантного анализа:

$$\begin{cases} (a, x) + y < 0, & a \in A, \\ (a, x) + y > 0, & a \in B. \end{cases}$$

Решение этой задачи обозначим через $[\tilde{x}, \tilde{y}]$. Далее введём обозначения:

$$z_i = \tilde{x}_i (i = \overline{1, n}), z_{n+1} = \tilde{y} z = [z_1, \dots, z_{n+1}], I^+ = \{i: z_i > 0\}, I^- = \{i: z_i < 0\}.$$

Рассмотрим следующую задачу математического программирования:

$$\begin{cases} \min(\sum_{i \in I^+} z_i - \sum_{i \in I^-} z_i) \\ \begin{cases} (\tilde{a}, z) < 1, & a \in A, \\ (\tilde{b}, z) > 1, & b \in B, \\ z_i \geq 0, & i \in I^+, \\ z_i \leq 0, & i \in I^-. \end{cases} \end{cases}$$

Здесь $\tilde{a} = [a; 1]$, $\tilde{b} = [b; 1]$.

Обозначим: A – матрица со строками a_1, \dots, a_k ; B – матрица со строками b_1, \dots, b_l ; \tilde{A} – матрица со строками $\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_k$; \tilde{B} – матрица со строками $\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_l$. Если P – матрица со столбцами p_1, \dots, p_n , то через $P(I)$, где $I = [i_1, \dots, i_s]$, обозначим матрицу со столбцами p_{i_1}, \dots, p_{i_s} .

Пусть множества I^+ , I^- упорядочены по возрастанию, $z = [z_1; z_2] = [x(I^+); x(I^-)]$. Рассмотрим задачу:

$$\begin{cases} \min(z_1 + \dots + z_n) \\ \tilde{A}(I^+)z_1 - \tilde{A}(I^-)z_2 \leq -1, \\ \tilde{B}(I^+)z_1 - \tilde{B}(I^-)z_2 \geq -1, \\ z = [z_1; z_2] \geq 0. \end{cases}$$

Обозначим $\tilde{A}(I^+) = A_1$, $\tilde{A}(I^-) = A_2$, $\tilde{B}(I^+) = B_1$, $\tilde{B}(I^-) = B_2$. Тогда задача линейного программирования принимает вид:

$$\begin{cases} \min(z_1 + \dots + z_n) \\ -A_1 z_1 + A_2 z_2 \geq 1, \\ B_1 z_1 - B_2 z_2 \geq 1, \\ y \geq 0. \end{cases}$$

Задача, двойственная к последней, выглядит так:

$$\begin{cases} \max(y_1 + y_2 + \dots) \\ -y_1 A_1 + y_2 B_1 \leq 1, \\ y_1 A_2 - y_2 B_2 \leq 1, \\ y \geq 0. \end{cases}$$

Пусть $y_{i0} = \max\{\tilde{y}_{1i}: i = \overline{1, k}\}$, $y_{i1}^* = \max\{\tilde{y}_{2i}: i = \overline{1, l}\}$. Если $\tilde{y}_{i0} > y_{i1}^*$, то полагаем $c = a_{i0}$, иначе $c = b_{i1}$. Далее находим окрестность вектора c , не содержащую других векторов материала обучения. Это и есть область для выбора новых объектов для экспертизы.

Здесь стоит отметить, что система неравенств может оказаться несовместной, для её решения в этом случае используется метод комитетов, описанный в [16].

3. Модели выбора как модификация модели прогнозирования финансово-экономического состояния

Для широкого класса проблем выбора и принятия решений, а также их интерпретации важна задача оценки корректности модели выбора, а в связи с этим и устойчивости решения, полученного по этой модели. С этой целью привлекается сопряженная модель, которая строится так: материал наблюдений, на основе которого идентифицируется модель выбора, разбивается на обучение и контроль. Соотношения модели, выполняющиеся на материале обучения, должны как следствия выполняться на контроле. Условия такого следования и составляют содержание сопряженной задачи. Степень выполнимости (устойчивость) этих условий характеризует устойчивость идентификации модели и, соответственно, устойчивость решающего правила, генерируемого по этой модели. В распознавании образов такая – импликационная – сопряженность получается как некоторая реализация принципа внешнего дополнения при моделировании. При этом внешнее дополнение может генерироваться и искусственно из материала наблюдений, и выбор такого дополнения должен быть согласован с некоторым критерием оптимальности, который может быть задан формальным образом.

Реализуем этот подход в алгоритме. Пусть имеется допустимое множество объектов D . Оно разбито на обучение и контроль:

$$D = D_1 \cup D_2.$$

Импликационная сопряженность – это условие того, что некоторая закономерность, выявленная на множестве D_1 , должна как следствие выполняться на множестве D_2 . То есть мы берем некоторый класс функций F (это могут быть как линейные, так и аффинные функции) и выделяем подмножество F_1 такое, что $f(x) \in M(f) \forall f \in F_1, x \in D_1$. Затем в качестве сопряженной задачи записываем условия следования того же самого для $x \in D_2$. Решение сопряженной задачи даст оценку устойчивости вывода закономерностей.

Сопряженность в моделировании и в принятии решений оказалась глубоким и содержательным явлением. Сопряженность традиционно идет от геометрии (отделимость множеств), от механики (метод вариаций, условия оптимальности и устойчивости механических систем), от экономики (оценивание факторов, условия равновесия и эффективности). На самом деле концептуальный генезис понятия сопряженности можно проследить из более общих принципов логики. Так, например, сопряженность связана с операцией отрицания. Фундаментальность понятия сопряженности проявляется и в важных для теории и практики содержательных результатах относительно устойчивости выбора вариантов решений, получаемых на основе алгоритмов анализа сопряженных задач.

Одна из ипостасей сопряженности – линейаризация модели, что связано и с операцией дифференцирования. В случае нейронных сетей речь идет о дифференцировании сложных функций. В случае выпуклого программирования – о маргинальных оценках, получаемых с помощью операции дифференцирования по направлению.

Здесь также рассмотрим случай включения представленного алгоритма в нейронную сеть, а именно, когда реакция нейросети на вход $x = [x_1, \dots, x_n]$ с вещественными координатами выражается дифференцируемой функцией $y = f(x)$. Пусть $\text{var}(x_i)$ – вариация переменной x_i , $\text{var}(x) = [\text{var}(x_1), \dots, \text{var}(x_n)]$. И мы можем сейчас применить обычную технику теории погрешностей. Обозначим $\text{var}(y) = f(x + \text{var}(x)) - f(x)$.

Поскольку функция f дифференцируема, то $\text{var}(y) = (df(x), \text{var}(x))$. Интересно сравнить это с более общей формулой. Если задача

$$\tilde{f}(y) = \max\{f(x, y) : f_j(x, y) \leq 0 (j = \overline{1, m})\}$$

есть задача выпуклого программирования при любом y из окрестности некоторого \tilde{y} , причем выполнен ряд условий, включая условие регулярности и

$$\tilde{M}(\tilde{y}) = \text{Arg}\{(1) : y = \tilde{y}\}$$

$$\tilde{M}^*(\tilde{y}) = \left\{ \begin{array}{l} \exists \tilde{x} \in \tilde{M}(\tilde{y}) \text{ такой, что} \\ \tilde{u} > 0 : [\tilde{x}, \tilde{u}] - \text{седло функции Лагранжа} \\ F(x, u, y) = f(x, y) - \sum_{j=1}^m u_j f_j(x, y) \end{array} \right\},$$

то производная по направлению l : $\frac{d\tilde{f}(\tilde{y})}{dl} = \left(\frac{d}{dy} (F(\tilde{x}, \tilde{u}, \tilde{y}))_{y=\tilde{y}}, l \right)$.

Выводы

Авторами предложена модификация модели прогнозирования финансово-экономического состояния медицинского учреждения с учетом специфики отрасли. Несмотря на использование строгого математического инструментария, модель является простой в использовании для пользователя, так как по сути может быть реализована как некоторый компонент компьютерной программы (нейронной сети), в который администратор вводит данные, а на выходе получает обработанный результат. В совокупности с уже ранее разработанными моделями предложенная модель будет представлять большой интерес для руководителей медицинской отрасли в случае ее программной реализации.

Список литературы

1. Титов В.А., Цыганов С.Н. Влияние средств автоматизации деятельности лечебно-профилактических учреждений на показатели эффективности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3-3. С. 505–506.
2. Кадыров Ф.Н. Экономические методы оценки эффективности деятельности медицинских учреждений. 2-е актуализир. изд. М.: Менеджер здравоохранения, 2011. 495 с.
3. Современные подходы к решению задач управления медицинских организаций / С.Б. Чолоян, А.К. Екимов, Е.Н. Байгазина и др. // Менеджер здравоохранения. 2021. № 10. С. 4–13. DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
4. Газизова Л.Р., Галимулина Ф.Ф. Система массового обслуживания в частной медицине // Управление устойчивым развитием. 2018. № 6 (19). С. 5–10.
5. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. 450 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10.12737/1087996
6. Методы и модели управления промышленными предприятиями и корпорациями / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, К.А. Коренная и др. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2022. 221 с. ISBN 978-5-696-05241-0.
7. Гилёв Д.В., Логиновский О.В. Модель интегральной оценки эффективности управления медицинской организацией на основе математического подхода // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 4. С. 108–122. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.4.06
8. Логиновский О.В., Гилёв Д.В. Совершенствование алгоритма управления оказанием медицинских услуг на основе комитетных методов // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 4. С. 105–120. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
9. Мазуров В.Д. Линейная оптимизация и моделирование. Свердловск: Урал. гос. ун-т им. А.М. Горького, 1986. 68 с.
10. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods // Pattern Recognition. 1987. Vol. 20, no 4. P. 371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
11. Еремин И.И., Мазуров Вл.Д. Нестационарные процессы математического программирования. М.: Наука, 1979. 287 с.
12. Мазуров В.Д., Мазуров А.Д., Шестаков А.А. Математические модели диагностики и прогнозирования в медицине и биологии // Вестник Уральского института экономики, управления и права. 2012. № 4 (21). С. 98–108.
13. Имитационное моделирование в задачах управления медицинской организацией амбулаторного типа / С.М. Щербаков, Е.Д. Теплякова, С.А. Румянцев, А.В. Василенок // Социальные аспекты здоровья населения. 2017. № 4 (56). С. 1–18. DOI: 10.21045/2071-5021-2017-56-4-7
14. Соколов Е.В., Самойлов Д.И. Экономико-математическая модель управления финансовым результатом работы структурных подразделений и поликлиники в целом // Экономика и управление: проблемы, решения. 2015. Т. 2, № 8. С. 22–32.
15. Prendergast L.A., Smith J.A. Influence functions for linear discriminant analysis: Sensitivity analysis and efficient influence diagnostics // Journal of Multivariate Analysis. 2022. Vol. 190. P. 104993. DOI: 10.1016/j.jmva.2022.104993
16. Мазуров Вл.Д. Комитеты систем неравенств и задача распознавания // Кибернетика. 1971, № 3. С. 140–146.

References

1. Titov V.A. [The influence of automation tools of medical and preventive institutions on performance indicators]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016;3-3:505–506. (In Russ.)
2. Kadyrov F.N. *Ekonomicheskie metody otsenki effektivnosti deyatel'nosti meditsinskikh uchrezhdeniy* [Economic methods of evaluating the effectiveness of medical institutions]. 2nd actualization. ed. Moscow: Menedzher zdravookhraneniya; 2011. 495 p. (In Russ.)
3. Choloyan S.B., Ekimov A.K., Baigazina E.N., Molodtsov N.S., Kalinina E.A., Posnov A.A. Modern approaches to solving the tasks of management of medical organizations. *Manager zdravookhraneniya*. 2021;(10):4–13. (In Russ.) DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
4. Gazizova L.R., Galimulina F.F. Mass service system in private medicine. *Managing sustainable development*. 2018;6(19):5–10. (In Russ.)
5. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures: Monograph*. Moscow: INFRA-M; 2020. 450 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10.12737/1087996
6. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Korennaya K.A., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Metody i modeli upravleniya promyshlennymi predpriyatiyami i korporatsiyami* [Methods and models of management of industrial enterprises and corporations]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2022. 221 p. (In Russ.) ISBN 978-5-696-05241-0.
7. Gilev D.V., Loginovskiy O.V. Integrated assessment model of medical organization management efficiency based on mathematical approach. *Applied mathematics and control sciences*. 2022;(4):108–122. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2022.4.06
8. Loginovskiy O.V., Gilev D.V. Improving the algorithm for managing the provision of medical services based on committee methods. *Applied mathematics and control sciences*. 2020;(4):105–120. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
9. Mazurov V.D. *Lineynaya optimizatsiya i modelirovanie* [Linear optimization and modeling]. Sverdlovsk: Ural State University named after A.M. Gorkiy; 1986. 68 p. (In Russ.)
10. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods. *Pattern Recognition*. 1987;20(4):371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
11. Eremin I.I., Mazurov V.D. *Nestatsionarnyye protsessy matematicheskogo programmirovaniya* [Nonstationary processes of mathematical programming]. Moscow: Nauka, 1979. 287 p. (In Russ.)
12. Mazurov V.D., Mazurov A.D., Shestakov A.A. Mathematical models of diagnostics and forecasting in medicine and biology. *Herald of the Ural institute of economics, management and law*. 2012;4(21):98–108. (In Russ.)
13. Shcherbakov S.M., Teplyakova E.D., Rumyantsev S.A., Vasilenok A.V. Simulation for outpatient medical organization management. *Social aspects of population health*. 2017;4(56):1–18. (In Russ.) DOI: 10.21045/2071-5021-2017-56-4-7
14. Sokolov E.V., Samoilov D.I. The economic-mathematical model of management of financial result of the structural units and outpatient clinics in general. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2015;2(8):22–32. (In Russ.)
15. Prendergast L.A., Smith J.A. Influence functions for linear discriminant analysis: Sensitivity analysis and efficient influence diagnostics. *Journal of Multivariate Analysis*. 2022;190:104993. DOI: 10.1016/j.jmva.2022.104993
16. Mazurov V. D. [Committees of systems of inequalities and the task of recognition]. *Cybernetics*. 1971;(3):140–146. (In Russ.)

Информация об авторах

Гилёв Денис Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.ru.

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 authors

Denis V. Gilev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.ru.

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.

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 25.12.2023

The article was submitted 25.12.2023

ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru

С.И. Моисеев, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Процесс принятия решений играет важную роль в развитии общества в целом и эффективном управлении организациями в частности. В современном мире, где сложность задач и конкурентная среда постоянно растут, принятие правильных и обоснованных решений становится ключевым элементом успеха. Любой человек, группа людей или организации постоянно сталкиваются с необходимостью выбора между несколькими возможными вариантами действий, называемых альтернативами, будь то в личной сфере или в работе организаций. Для эффективного принятия сложных решений в рамках деятельности организаций разработаны модели принятия оптимальных решений. Наиболее популярной из них является модель принятия решений в условиях определенности, когда на результат решения не оказывают воздействие случайные факторы. Все это подтверждает актуальность научных исследований в области принятия решений. **Цель исследования** заключается в разработке методики оценки степени привлекательности альтернатив на основе объективных количественных либо субъективных качественных критериев, что позволит повысить качество принимаемых решений. В основе методики лежат математические модели обработки информации, содержащей характеристики альтернатив по критериям оценивания. **Материалы и методы.** В основе приведенной в работе методики оценки альтернатив лежат математические модели обработки информации, которые основаны на методах математического моделирования, методах оптимизации, линейного программирования, теории нечетких множеств, теории латентных переменных, а также методы принятия решений в условиях неопределенности и методы экспертного оценивания. **Результаты.** В работе предложена методика оценивания степени привлекательности альтернатив при принятии решений в условиях определенности, а также описаны модели обработки информации, на основании которой производится оценивание альтернатив по критериям. Рассмотрены два варианта оценивания: по количественным критериям, которые оперируют объективными характеристиками альтернатив, и по качественным критериям, характеристики альтернатив для которых получаются на основе субъективного экспертного оценивания. Экспертное оценивание рассмотрено как для индивидуальной экспертизы одним экспертом, так и для группового экспертного оценивания множеством экспертов. **Заключение.** Применение приведенной методики в процедуру принятия решений в условиях определенности позволит повысить качество принимаемых решений и снизить риски от их реализации.

Ключевые слова: принятие решений, оценки альтернатив, математическое моделирование, критерии оценивания, нечеткие множества, латентные переменные

Для цитирования: Серебрякова Е.А., Баркалов С.А., Моисеев С.И. Оценка альтернатив: новые подходы принятия решений в условиях определенности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 90–98. DOI: 10.14529/ctcr240308

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240308

EVALUATING ALTERNATIVES: NEW APPROACHES FOR DECISION MAKING UNDER CERTAINTY

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru

S.I. Moiseev, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The decision-making process plays an important role in the development of society in general and the effective management of organizations in particular. In today's world, where the complexity of tasks and the competitive environment are constantly growing, making the right and informed decisions becomes a key element of success. Any person, group of people or organization is constantly faced with the need to choose between several possible courses of action, called alternatives, whether in the personal sphere or in the work of organizations. To effectively make complex decisions within the activities of organizations, models for making optimal decisions have been developed. The most popular of them is the model of decision-making under conditions of certainty, when the outcome of the decision is not influenced by random factors. All this confirms the relevance of scientific research in the field of decision making. **Aim.** The purpose of the study is to develop a methodology for assessing the degree of attractiveness of alternatives based on objective quantitative or subjective qualitative criteria, which will improve the quality of decisions made. The methodology is based on mathematical models for processing information containing the characteristics of alternatives according to evaluation criteria. **Materials and methods.** The methodology for evaluating alternatives presented in the work is based on mathematical models of information processing, which are based on methods of mathematical modeling, optimization methods, linear programming, theory of fuzzy sets, theory of latent variables, as well as methods of decision-making under conditions of uncertainty and methods of expert assessment. **Results.** The relevance of the development of a model for evaluating construction projects according to quantitative criteria is shown, ways of solving the tasks are given and justified. A mathematical model has been developed that makes it possible to evaluate construction projects by objective indicators based on the theory of fuzzy sets and the Rush model for estimating latent variables. On the basis of numerical methods, the adequacy of the received estimates of construction projects is substantiated, the methodology for implementing computational procedures necessary for the practical implementation of evaluation models is described. **Conclusion.** The application of the given methodology in the decision-making procedure under conditions of certainty will improve the quality of decisions made and reduce the risks of their implementation.

Keywords: decision making, evaluation of alternatives, mathematical modeling, evaluation criteria, fuzzy sets, latent variables

For citation: Serebryakova E.A., Barkalov S.A., Moiseev S.I. Evaluating alternatives: new approaches for decision making under certainty. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):90–98. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240308

Введение

Принятие решений – это неотъемлемая часть нашей повседневной жизни. Любой человек, группа людей или организации постоянно сталкивается с необходимостью выбора между несколькими возможными вариантами действий, называемых альтернативами, будь то в личной сфере или в работе организаций. Для эффективного принятия сложных решений в рамках деятельности организаций разработаны модели принятия оптимальных решений. Наиболее популярной из них является модель принятия решений в условиях определенности [1], когда на результат решения не оказывают воздействие случайные факторы. При этом важнейшим этапом в процессе принятия решений является оценка альтернатив.

Под оценкой альтернатив будем понимать процесс получения степени ее привлекательности для лица, принимающего решение (ЛПР) в целом или по некоторому критерию (показателю) в частности.

При оценке альтернатив важно учитывать различные аспекты, такие как стоимость, время, ресурсы, потенциальные риски и выгоды. Необходимо также учитывать цели и ценности, которые необходимо достичь с помощью принимаемого решения. Ввиду этого процесс оценки альтернатив часто является многокритериальным.

Целью данной работы является описание методики оценки степени привлекательности альтернатив на основе объективного или экспертного оценивания. Данная методика будет содержать математические методы оценивания, некоторые из них отличаются научной новизной.

В основе математических моделей и в качестве математического инструментария, входящих в методику оценивания альтернатив, лежат теории нечетких множеств [2–4], теория латентных переменных, а именно модель Раша оценки латентных переменных [5–8], а также методы принятия решений в условиях неопределенности и методы экспертного оценивания.

Общая схема оценивания альтернатив

Постановка задачи следующая: имеется некоторое количество объектов, субъектов, процессов или признаков, которые мы назовем альтернативами, и необходимо каждой из них поставить в соответствие некоторое числовое значение, характеризующее степени привлекательности альтернатив для ЛПР.

Структурная схема процесса оценки альтернатив и принятия решений в условиях определенности приведена на рис. 1.

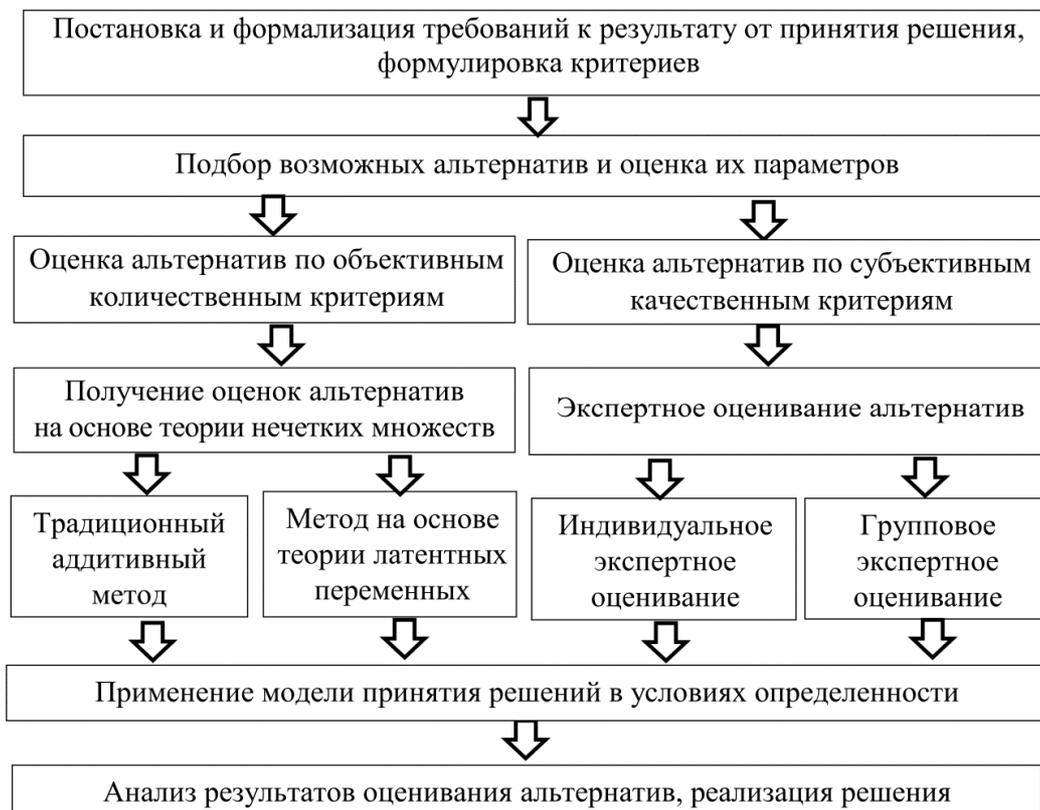


Рис. 1. Структурная схема оценки альтернатив
Fig. 1. Block diagram for evaluating alternatives

Таким образом, можно выделить два основных направления оценки альтернатив: оценка по объективным количественным критериям и оценка по субъективным или качественным критериям. Рассмотрим эти направления подробнее.

Методика оценки альтернатив на основе объективных критериев

Рассмотрим модель оценки альтернатив, которая базируется на методах теории нечетких множеств [2–4]. Число возможных альтернатив обозначим через n , а сами альтернативы будем

обозначать как A_1, A_2, \dots, A_n . Необходимо получить оценку каждой альтернативы U_i , на основании m критериев K_1, K_2, \dots, K_m .

Введем частные оценки u_{ij} – привлекательность i -й альтернативы по j -му критерию. Чтобы определить данные оценки, необходимо задать идентифицирующие признаки, определяющие степень привлекательности каждой альтернативы для каждого оценочного критерия. Каждому критерию K_j в такой постановке задачи будет соответствовать нечеткое множество с определенной заранее функцией принадлежности, которая формируется из типа и условия критерия, которую обозначим как $\mu_j(x)$. Если альтернатива A_i описывается характеристикой критерия x_i , то для оценки ее привлекательности с использованием функции принадлежности нечеткого множества будем применять следующую зависимость:

$$u_{ij} = \mu_j(x_i). \quad (1)$$

Если важности критериев для оценивания разные, то введем вес w_j критерия K_j , тогда оценки альтернатив U_i будут равны:

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_j u_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_j(x_i). \quad (2)$$

Такой способ оценивания альтернатив назовем аддитивным. Он традиционно используется на практике. Однако он имеет ряд недостатков, например, оценки альтернатив U_i зависят от степени выполнимости или невыполнимости критериев для всего множества альтернатив [9].

Для устранения этого недостатка и улучшения качества оценок опишем альтернативный метод оценивания альтернатив, который базируется на модели Раша оценки латентных переменных с вычислительным ядром, основанным на методе наименьших квадратов [7, 8]. Для этого введем дополнительные параметры β_j , имеющие смысл уровня невыполнимости оценочного критерия K_j для множества всех альтернатив, который можно интерпретировать как строгость критерия, то есть чем ниже данный параметр, тем лучше и привлекательнее выглядит вся группа альтернатив для приведенного критерия.

Исходя из теории модели Раша, для нахождения оценок альтернатив U_i и свойств критериев β_j нужно решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j \cdot \left(u_{ij} - \frac{e^{U_i - \beta_j}}{1 + e^{U_i - \beta_j}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$U_i \geq 0; \beta_j \geq 0; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m.$$

Данная модель имеет преимущества перед аддитивной: оценки альтернатив являются их индивидуальными характеристиками и не зависят от набора критериев, они измеряются по линейной безразмерной шкале, а также кроме оценок альтернатив удается получить свойства влияния критериев на результаты оценивания.

Методы индивидуального экспертного оценивания альтернатив по качественным критериям

В данном разделе опишем теоретические основы модели оценивания альтернатив по качественным или субъективным критериям на основе экспертного оценивания.

В настоящее время существует большое количество методов и инструментов для оценивания альтернатив по качественным критериям, которые могут быть разделены на несколько групп [10, 11]: экспертные методы, методы статистического анализа, методы экономического анализа, информационно-аналитические методы, теория латентных переменных.

Рассмотрим сначала индивидуальное экспертное оценивание альтернатив. Наиболее эффективной моделью проведения экспертного оценивания альтернатив одним экспертом являются методы парных сравнений, наиболее популярным из которых является метод анализа иерархий (МАИ), который подробно описан в литературе [12–14], поэтому его мы в рамках данной работы касаться не будем. МАИ далеко не совершенный метод, дискуссии по его улучшению ведутся с момента разработки метода Т. Саати. Основные претензии касаются несогласованности матрицы парных сравнений вычислительным сложностям, возникающим при большом числе сравниваемых признаков и иным аспектам.

В данной работе опишем альтернативный МАИ метод проведения индивидуальной экспертизы на основе парных сравнений, который основан на теории латентных переменных и модели Раша. Математическое обоснование этого метода приведено в работах [15, 16].

Математическая постановка модели оценивания альтернатив во многом схожа с методикой оценивания по МАИ. Рассмотрим ситуацию, когда необходимо оценить n альтернатив по качественному критерию. Оценкой альтернатив занимается эксперт, при этом оценку он осуществляет путем сравнения превосходства одной альтернативы над другой для всех возможных их пар. Для каждой пары альтернатив, которых обозначим как A_i и A_j , введем вероятностный показатель p'_{ij} , который является индикатором степени предпочтения привлекательности одной альтернативы над другой. Этот показатель можно интерпретировать как долю предпочтения по единичной шкале между альтернативами, в простейшей интерпретации это вероятность того, что первая альтернатива в паре будет выбрана как более привлекательная, чем вторая.

Для визуализации параметра p'_{ij} приведем единичную шкалу с некоторой меткой на ней, которая перемещается между парой сравниваемых признаков (альтернатив), определяя степень предпочтения в данной паре, что изображено на рис. 2.

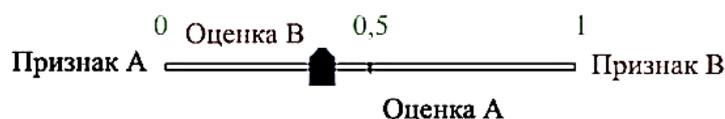


Рис. 2. Визуализация смысла параметра p'_{ij}

Fig. 2. Visualization of the meaning of the parameter p'_{ij}

Очевидно, что в таком подходе справедливы соотношения:

$$p'_{ij} = 1 - p'_{ji}; \quad p'_{ii} = 0,5.$$

Введем латентные переменные U_i , равные оценкам альтернатив. Согласно модели Раша, вероятность P_{ij} того, что альтернатива A_i , имеющая оценку по заданному критерию U_i , при оценке оказалась более привлекательной по сравнению с альтернативой A_j , имеющей оценку привлекательности U_j , связана следующим соотношением:

$$P_{ij} = \frac{e^{U_i - U_j}}{1 + e^{U_i - U_j}}, \quad (4)$$

а для нахождения оценок альтернатив необходимо решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p'_{ij} - P_{ij})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p'_{ij} - \frac{e^{U_i - U_j}}{1 + e^{U_i - U_j}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\min_i U_i = 0.$$

Полученные оценки будут определены на полубесконечной шкале $(0; \infty)$, и чтобы привести их в соответствие с МАИ, необходимо выполнить линейное нормирование на шкалу с единичной суммой.

Для оценки альтернатив можно провести и многокритериальное оценивание. Предположим, что имеется K критериев оценки привлекательности альтернатив. Введем некоторые критерии оценивания альтернатив с номером i , которые обозначим через U_i^k по каждому k -му оценочному критерию. Также зададим веса, или степени важности оценочных критериев w^k , которые определяются по методу МАИ или на основе теории латентных переменных. На основании полученных данных вычисляются некоторые итоговые показатели оценки альтернатив U_i по качественным критериям по всей их совокупности, которые определяются для каждой альтернативы, они равны

$$U_i = \sum_k U_i^k w^k$$

и служат итоговой оценкой привлекательности альтернатив для всего множества оценочных критериев.

Методы группового экспертного оценивания альтернатив по качественным критериям

Важные решения, особенно в профессиональной деятельности как правило принимаются коллегиально, поэтому далее рассмотрим методы группового экспертного оценивания альтернатив.

Рассмотрим ситуацию, когда оценка множества из N альтернатив производится с помощью группы из K экспертов, которые оценили каждую из альтернатив по произвольной линейной шкале. Сразу стоит отметить, что экспертные оценки должны быть согласованными, поэтому сразу после получения экспертизы ее нужно проверить на согласованность на основании коэффициента конкордации [11].

Результаты экспертизы запишем в виде матрицы X , каждый элемент которой x_{ij} имеет смысл степени привлекательности i -й альтернативы, которую предоставил эксперт с номером j . Рассмотрим несколько методов обработки экспертной информации.

1. Метод обработки экспертной информации, учитывающий компетентность экспертов

Этот метод аналогичен простейшему аддитивному методу, когда итоговые оценки альтернатив равны средневзвешенному экспертному мнению, но является более эффективным ввиду того, что вклады экспертов в итоговое мнение не равны, как в аддитивном методе, а пропорциональны компетентности экспертов [17, 18]. Под компетентностью эксперта здесь понимается некоторый показатель, характеризующий то, насколько индивидуальное экспертное мнение совпадает с общегрупповым. Процедура получения итоговых оценок альтернатив производится итерационным методом [19]. Обозначим в дальнейшем через Q вектор-столбец показателей компетентности экспертов, а через U – вектор-строку итоговых оценок альтернатив.

На нулевой итерации будем считать, что все эксперты одинаково компетентны и вклад эксперта в итоговую оценку будет равен $1/K$, то есть столбец $Q^{(0)}$ на нулевой итерации содержит только эти элементы. Далее на основании этого вектора находим оценки альтернатив на первой итерации, по ним определяем компетентности экспертов на первой итерации, находим оценки альтернатив на второй и т. д. Математически итерационный процесс можно описать в виде:

$$\begin{cases} U^{(t)} = X \cdot Q^{(t-1)}; \\ Q^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} U^{(t)} \cdot X, \quad t=1, 2, \dots, \end{cases} \quad (6)$$

где $\lambda^{(t)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K U_i^{(t)} \cdot x_{ij}$.

Учитывая то, что $U^{(t)} \cdot X = X' \cdot U^{(t)}$, где штрихом обозначена матричная операция транспонирования, выражение (6) можно записать в ином виде:

$$\begin{cases} U^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} X \cdot X' \cdot U^{(t-1)}, \\ Q^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} X' \cdot X \cdot Q^{(t-1)}. \end{cases} \quad (7)$$

Количество итераций определяется из условий достижения необходимой точности, для точности порядка 0,001, как показывает практика, достаточно использовать 2–3 итерации.

2. Обработка экспертной информации, основанная на методах корреляции

Данный метод обработки экспертных оценок дает примерно тот же результат, что и предыдущий метод, и является довольно точным его приближением, не требующим проведения итерационного процесса. Согласно этому методу обобщенная экспертная оценка альтернатив U_i рассчитывается по формуле

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^K r_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^K r_j}, \quad (8)$$

где r_j – коэффициенты парной корреляции между j -м столбцом матрицы x_{ij} и начальным приближением столбца оценок альтернатив \bar{x}_i , где $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}$.

3. Обработка экспертной информации на основе теории латентных переменных

Данный подход не учитывает компетентность экспертов, зато позволяет получать независимые оценки для любого набора экспертов, учитывая их строгость или лояльность к оцениваемым альтернативам.

Как и в предыдущих моделях, вводим латентный показатель β_j , имеющий смысл строгости-лояльности j -го эксперта, то есть чем меньше значение данного параметра, тем более требовательным или строгим является эксперт относительно всего множества оцениваемых альтернатив.

Тогда в соответствии с моделью Раша, вычислительным ядром которой является метод наименьших квадратов [7, 8], для нахождения оценок альтернатив и показателей строгости экспертов необходимо решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \left(x_{ij} - \frac{e^{U_i - \beta_j}}{1 + e^{U_i - \beta_j}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$U_i \geq 0; \beta_j \geq 0; i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, K.$$

Данный метод позволяет получать независимые оценки альтернатив по линейной шкале, а также учитывает индивидуальные особенности проведения экспертизы каждым экспертом.

Заключение

В данной работе предложена методика оценивания степени привлекательности альтернатив с точки зрения ЛППР при принятии решений в условиях определенности, а также описаны модели обработки информации, на основании которой производится оценивание альтернатив по некоторым критериям.

Рассмотрены два варианта оценивания: по количественным критериям, которые оперируют объективными характеристиками альтернатив, и по качественным критериям, характеристики альтернатив для которых получаются на основе субъективного экспертного оценивания.

При использовании количественных критериев, базирующихся на объективных характеристиках оцениваемых альтернатив, процедура оценивания содержит два уровня. На первом уровне формируются функции принадлежности группы нечетких множеств, соответствующие критериям, базирующихся на объективных характеристиках альтернатив и определяющих степень привлекательности альтернатив по критериям. Подставляя показатели альтернатив в функции принадлежности, можно определить объективную оценку альтернатив. На втором уровне производится свертка альтернатив по критериям на основании аддитивного метода или метода, основанного на теории латентных переменных, что приводит к получению итоговых оценок альтернатив.

При использовании качественных критериев получение оценок альтернатив производится экспертными методами. Рассмотрены случаи индивидуальной и групповой экспертизы.

При индивидуальном экспертном оценивании традиционно используется метод анализа иерархий, однако в работе предложен альтернативный метод оценивания, основанный на теории латентных переменных. Данный метод является менее чувствительным к несогласованности парных оценок и содержит более объективную шкалу сравнений альтернатив в паре [20].

При групповом экспертном оценивании традиционный аддитивный метод дополняется методом обработки экспертной информации, основанной на компетентности экспертов, что позволит в какой-то мере нивелировать влияние на итоговую оценку некачественного экспертного мнения. Также предложен приближенный вариант данного метода, основанный на корреляционном анализе.

Применение приведенной методики в процедуре принятия решений в условиях определенности позволит повысить качество принимаемых решений и снизить риски от их реализации.

Список литературы

1. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. М.: Наука, 2007. 143 с.
2. Назаров Д.М. Интеллектуальные системы: основы теории нечетких множеств: учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 618 с.
3. Gottwald S. Universes of Fuzzy Sets and Axiomatizations of Fuzzy Set Theory. Part I: Model-Based and Axiomatic Approaches // Studia Logica. 2006. Vol. 82 (2). P. 211–244. DOI: 10.1007/s11225-006-7197-8
4. Кофман А.С. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Огни, 2013. 432 с.

5. Rasch G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research, 1960. 160 p.
6. Rasch Models. Foundations, Recent Developments, and Applications / Editors G.H. Fischer, I.W. Molenaar. Springer, 1997.
7. Маслак А.А., Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства: моногр. Воронеж: НПЦ «Научная книга», 2016. 177 с.
8. Моисеев С.И., Киреев Ю.В., Гончаров С.В. Модель оценки латентных переменных с непрерывными множествами исходных данных и ее приложения // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57, № 3.1 (57). С. 161–167.
9. Mathematical Models of Expert Information Processing for Evaluation of Projects / S.A. Barkalov, S.I. Moiseev, O.S. Perevalova, L.V. Shevchenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 227. P. 737–744. DOI: 10.1007/978-981-16-0953-4_72
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 2003. 79 с.
11. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертиз и анализ экспертной информации. М.: Наука, 2004. 120 с.
12. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
13. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. P. 87–110.
14. Пономарева А.Н. Использование метода анализа иерархий в отборе приоритетных критериев анализа инновационной деятельности предприятий // Актуальные вопросы экономических наук. 2010. № 11-1. С. 235–240.
15. Баркалов С.А., Карпович М.А., Моисеев С.И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 58–66. DOI: 10.14529/ctcr220205
16. Алгоритм и методы принятия управленческих решений на основе теории латентных переменных в условиях временных ограничений / С.А. Баркалов, А.В. Ананьев, К.С. Иванников, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 106–116. DOI: 10.14529/ctcr220310
17. Китаев Н.Н. Групповые экспертные оценки. М.: Знание, 2005. 64 с.
18. Кузьмин В.Б., Орлов А.И. Статистические методы анализа экспертных оценок. М.: Наука, 2007. С. 220–227.
19. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. 265 с.
20. Мельников А.В., Моисеев С.И. Альтернативный метод проверки степени согласованности матрицы парных сравнений // Системы управления и информационные технологии. 2023. № 2 (92). С. 49–52.

References

1. Larichev O.I. *Ob'yektivnyye modeli i sub'yektivnyye resheniya* [Objective models and subjective decisions]. Moscow: Nauka; 2007. 143 p. (In Russ.)
2. Nazarov D.M. *Intellektual'nyye sistemy: osnovy teorii nechetkikh mnozhestv: uchebnoye posobiye dlya akademicheskogo bakalavriata* [Intelligent systems: foundations of the theory of fuzzy sets. Textbook for academic bachelor's degree]. Moscow: Yurayt; 2017. 618 p. (In Russ.)
3. Gottwald S. Universes of Fuzzy Sets and Axiomatizations of Fuzzy Set Theory. Part I: Model-Based and Axiomatic Approaches. *Studia Logica*. 2006;82(2):211–244. DOI: 10.1007/s11225-006-7197-8
4. Kofman A.S. *Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Ognj; 2013. 432 p. (In Russ.)
5. Rasch G. *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests*. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research; 1960. 160 p.
6. Fischer G.H., Molenaar I.W. (Eds.). *Rasch Models. Foundations, Recent Developments, and Applications*. Springer, 1997.
7. Maslak A.A., Moiseev S.I. *Model' Rasha otsenki latentnykh peremennykh i yeye svoystva: monografiya* [The Rasch model for estimating latent variables and its properties. Monograph]. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2016. 177 p. (In Russ.)

8. Moiseev S.I., Kireev Yu.V., Goncharov S.V. [A model for estimating latent variables with continuous sets of initial data and its applications]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2014;3.1(57):161–167. (In Russ.)
9. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Perevalova O.S., Shevchenko L.V. Mathematical Models of Expert Information Processing for Evaluation of Projects. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021;227:737–744. DOI: 10.1007/978-981-16-0953-4_72
10. Beshelev S.D., Gurvich F.G. *Ekspertnyye otsenki* [Expert assessments]. Moscow: Nauka; 2003. 79 p. (In Russ.)
11. Pankova L.A., Petrovsky A.M., Shneiderman M.V. *Organizatsiya ekspertiz i analiz ekspertnoy informatsii* [Organization of examinations and analysis of expert information]. Moscow: Nauka; 2004. 120 p. (In Russ.)
12. Saaty T.L., Kearns K.P. Analytical Planning. The Organization of Systems. Pergamon Press; 1985.
13. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1993; 2:87–110.
14. Ponomareva A.N. [Using the method of analysis of hierarchies in the selection of priority criteria for analyzing the innovative activities of enterprises]. *Aktual'nye voprosy ekonomicheskikh nauk*. 2010;11-1:235–240. (In Russ.)
15. Barkalov S.A., Karpovich M.A., Moiseev S.I. Analytic hierarchy process: An approach based on the theory of latent variables. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):58–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220205
16. Barkalov S.A., Ananiev A.V., Ivannikov K.S., Moiseev S.I. Algorithm and methods for management decision-making based on the theory of latent variables under time conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3):106–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220310
17. Kitaev N.N. *Grupповые ekspertnyye otsenki* [Group expert assessments]. Moscow: Znanie; 2005. 64 p. (In Russ.)
18. Kuzmin V.B., Orlov A.I. *Statisticheskiye metody analiza ekspertnykh otsenok* [Statistical methods for analyzing expert assessments]. Moscow: Nauka; 2007. P. 220–227. (In Russ.)
19. Barkalov S.A., Moiseyev S.I., Poryadina V.L. *Matematicheskiye metody i modeli v upravlenii i ikh realizatsiya v MS Excel* [Mathematical Methods and Models in Management and Their Implementation in MS Excel]. Voronezh: SUACE Publ.; 2015. 265 p. (In Russ.)
20. Melnikov A.V., Moiseev S.I. Alternative method for checking the consistency of a pairwise comparison matrix. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2023;2(92):49–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Моисеев Сергей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; mail@moiseevs.ru.

Information about the authors

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Sergey I. Moiseev, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; mail@moiseevs.ru.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024

The article was submitted 26.02.2024

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕДИЦИНСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА МАЛМКВИСТА

А.В. Кутышкин, avk_200761@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3226-0360>

Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия

Аннотация. В работе приведены оценки динамики медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений Ханты-Мансийского автономного округа в период с 2013 по 2021 г. с использованием индекса Малмквиста. **Цель исследования.** Целью исследования является анализ динамики значений медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, объединенных по административно-территориальному признаку, с использованием индекса Малмквиста совместно с оболочечным анализом данных. **Материалы и методы.** Оценки непосредственно медицинской эффективности указанных учреждений осуществлялись с использованием оболочечного анализа данных. Набор входных и выходных данных анализируемых учреждений характеризовал эффективность предоставления медицинских услуг в стационарных и амбулаторных условиях учреждений. Мультипликативная декомпозиция индекса Малмквиста позволила проанализировать характер и уровень влияния на его значения таких факторов, как технологические изменения в предметной области, эффективность работы менеджмента лечебно-профилактических учреждений и изменения их масштабов, т. е. объемов предоставляемых медицинских услуг. **Результаты.** По результатам исследования установлено, что наибольшее влияние на изменения медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений оказывают изменения значений технологической компоненты разложения индекса Малмквиста. Компонента разложения, характеризующая эффективность работы менеджмента этих учреждений, практически нейтральна. Это указывает на то, что менеджментом региональных медицинских учреждений накоплен достаточно большой и успешный опыт управления. Влияние же компоненты масштаба зависит от колебаний как объемов предоставляемых медицинских услуг, так и численности медицинского персонала учреждений. Особенно это проявилось в период пандемии, характеризовавшейся жесткими карантинными ограничениями. **Заключение.** Использование индекса Малмквиста и компонент его мультипликативного разложения позволяет внешним и внутренним заинтересованным лицам осуществлять не только оценку медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений, что актуально с точки зрения использования ими выделяемого финансирования, но и выявлять носителей «лучших практик» в части освоения и реализации технологий предоставления медицинских услуг, управления медицинским учреждением и адаптации к изменяющимся внутренним и внешним условиям его функционирования.

Ключевые слова: эффективность, медицинские учреждения, оболочечный анализ данных, индекс Малмквиста, декомпозиция индекса Малмквиста

Для цитирования: Кутышкин А.В. Исследования динамики медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений региона с использованием индекса Малмквиста // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 99–110. DOI: 10.14529/ctcr240309

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240309

RESEARCH ON THE DYNAMICS OF MEDICAL EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF MEDICAL INSTITUTIONS IN THE REGION USING THE MALMQUIST INDEX

A.V. Kutyshkin, *avk_200761@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-3226-0360>
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

Abstract. The paper provides assessments of the dynamics of the medical efficiency of the functioning of medical institutions in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug in the period from 2013 to 2021 using the Malmquist index. **Purpose of the study.** The purpose of the study is to analyze the dynamics of the values of medical efficiency of the functioning of medical institutions of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Ugra, united on an administrative-territorial basis, using the Malmquist index together with shell data analysis. **Materials and methods.** Direct assessments of the medical effectiveness of these institutions were carried out using shell data analysis. The set of input and output data of the analyzed institutions characterized the effectiveness of the provision of medical services in inpatient and outpatient settings of the institutions. The multiplicative decomposition of the Malmquist index made it possible to analyze the nature and level of influence on its values of such factors as technological changes in the subject area, the efficiency of the management of medical institutions and changes in their scale, i.e. volumes of medical services provided. **Results.** Based on the results of the study, it was established that changes in the values of the technological component of the decomposition of the Malmquist index have the greatest influence on changes in the medical efficiency of the functioning of medical institutions. The decomposition component, which characterizes the efficiency of the management of these institutions, is practically neutral. This indicates that the management of regional medical institutions has accumulated quite a large and successful management experience. The influence of the scale component depends on fluctuations in both the volume of medical services provided and the number of medical personnel in institutions. This was especially evident during the pandemic, characterized by strict quarantine restrictions. **Conclusion.** The use of the Malmquist index and the component of its multiplicative decomposition allows external and internal stakeholders to not only assess the medical effectiveness of the functioning of medical institutions, which is important from the point of view of their use of allocated funding, but also to identify the bearers of “best practices” in terms of the development and implementation of technologies provision of medical services, management of a medical institution and adaptation to changing internal and external conditions of its functioning.

Keywords: efficiency, medical institutions, Data Envelopment Analysis, Malmquist index, Malmquist index decomposition

For citation: Kutyshkin A.V. Research on the dynamics of medical efficiency of the functioning of medical institutions in the region using the Malmquist index. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):99–110. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240309

Введение

Для оценки эффективности использования основных видов ресурсов функционирующими организационно-техническими системами (ОТС) различной сложности в настоящее время используются параметрический и непараметрический подходы. В рамках первого, как правило, используются балансовые модели [1], аппарат производственных функций [2] и реже методология функционально-стоимостного анализа [3]. Основными недостатками указанных методов является необходимость идентификации функциональных зависимостей между величиной конечного продукта и объемами ресурсов, используемых для его производства. Непараметрические же методы не требуют установления подобного вида зависимостей и позволяют при оценке эффективности использования ресурсов ОТС оперировать различными наборами входных и выходных показателей – ресурсов, что достаточно актуально при анализе эффективности функционирования тех же лечебно-профилактических или медицинских учреждений (МУ), для которых различают экономическую, медицинскую и социальную эффективности [4, 5]. Актуальность подобного рода оце-

нок обусловлена устойчивым спросом со стороны внутренних и внешних потребителей. К первым относится как непосредственно менеджмент медицинских учреждений, так и менеджмент системы здравоохранения регионального уровня. В качестве внешних потребителей выступают страховые компании, участвующие в финансировании системы здравоохранения. В последнее время достаточно часто для оценки медицинской эффективности МУ используется оболочечный анализ данных (Data Envelopment Analysis, DEA-метод) [6–11]. В результате использования DEA-метода, многократно использующего линейное программирование, формируется непараметрическая граница – граница производственных возможностей (ГПВ) для группы анализируемых ОТС, которые принято называть Decision Making Unit (DMU) или производственные объекты (ПО). Для построения ГПВ используются переменные, соответствующие входным и выходным показателям функционирующих DMU. Построенная граница включает в себя все эффективные DMU, а вне границы располагаются все неэффективные DMU-группы. Эффективность функционирования DMU зависит от соотношения затрат ресурсов и объемов выпуска конечного продукта (услуги). Базовые модели DEA-метода (DEA-модели) характеризуются постоянным (Constant Resources Scale, CRS) и переменным (Various Resources Scale, VRS) масштабом отдачи преобразования входных показателей в выходные и могут быть входо- и выходоориентированные [7, 12]. Эти DEA-модели не могут использоваться для оценки влияния времени на изменение эффективности функционирования рассматриваемых DMU. Чтобы преодолеть это ограничение, вместе с DEA можно использовать индекс производительности Стена Малмквиста (Malmquist index, MI), который представляется [13–15] в виде произведения трех составляющих, характеризующих влияние изменения технического прогресса в предметной области DMU, чистую техническую эффективность функционирования DMU и изменение эффективности масштаба DMU.

Научная новизна данной работы состоит в оценках динамики медицинской эффективности функционирования медицинских учреждений региона с использованием индекса Малмквиста, мультипликативная декомпозиция которого позволяет определить характер и интенсивность влияния медицинскую эффективность таких факторов, как технологические изменения в предметной области, эффективность работы менеджмента МУ и изменения их масштабов, т. е. объемов предоставляемых медицинских услуг.

Цель исследования

Целью исследования является анализ динамики значений медицинской эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, объединенных по административно-территориальному признаку, с использованием индекса Малмквиста.

Материалы и методы

Производственными объектами – DMU (ПО), функционирование которых было объектом анализа, являлись медицинские учреждения ХМАО-Югра, объединенные по административно-территориальному признаку. Данные DMU можно считать однородными производственными объектами, так как они функционируют в одинаковых социально-экономических условиях, предоставляя населению практически одинаковый перечень медицинских услуг, которые реализуются по утвержденным Минздравом РФ регламентам и протоколам. Примем, что в любой момент времени t наблюдаемого интервала/периода времени $[t_0, t_L]$ состояние каждого j -го DMU ($j = 1, \dots, N$) описывается множествами входных показателей $x_{j,t} = \{x_{1,j,t}, \dots, x_{k,j,t}, \dots, x_{K,j,t}\} (k = 1, \dots, K)$ и выходных показателей $y_{j,t} = \{y_{1,j,t}, \dots, y_{i,j,t}, \dots, y_{M,j,t}\} (i = 1, \dots, M)$, которые формируют соответствующие матрицы $X_t [K \times N]$ и $Y_t [M \times N]$. Индекс Малмквиста $MI_j^{\tau,t}$, характеризующий изменение эффективности функционирования j -го DMU (ПО) в году « t » по отношению к некоторому базисному году « τ » ($t, \tau \in [t_0, t_L]$), определяется выражением [13–15]

$$MI_j^{\tau,t}(x_{j,\tau}, y_{j,\tau}, x_{j,t}, y_{j,t}) = \left[\frac{E_j^{\tau}(x_{j,t}, y_{j,t})}{E_j^{\tau}(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})} \times \frac{E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})}{E_j^t(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})} \right]^{0,5} \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{cases} [E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})]^{-1} = \max_{\theta, \lambda} \theta \\ -\theta y_{j,t} + Y_t \lambda_j \geq 0; \\ x_{j,t} - X_t \lambda_j \geq 0; \\ \lambda_j \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} [E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})]^{-1} = \max_{\theta, \lambda} \theta \\ -\theta y_{j,\tau} + Y_\tau \lambda_j \geq 0; \\ x_{j,\tau} - X_\tau \lambda_j \geq 0; \\ \lambda_j \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} [E_j^t(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})]^{-1} = \max_{\theta, \lambda} \theta \\ -\theta y_{j,\tau} + Y_t \lambda_j \geq 0; \\ x_{j,\tau} - X_t \lambda_j \geq 0; \\ \lambda_j \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} [E_j^\tau(x_{j,t}, y_{j,t})]^{-1} = \max_{\theta, \lambda} \theta \\ -\theta y_{j,t} + Y_\tau \lambda_j \geq 0; \\ x_{j,t} - X_\tau \lambda_j \geq 0; \\ \lambda_j \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Если расчетное значение $MI_j^{\tau,t}$ (1) больше «1», то принято считать, что эффективность использования принятых факторов производства – входных показателей $x_{j,t}$ рассматриваемых DMU_j в году «t» по отношению к году «τ» – увеличилась. Верно и обратно, т. е. если $MI_j^{\tau,t}$ меньше «1», то эффективность использования этих факторов производства в году «t» по отношению к году «τ» снизилась. При $MI_j^{\tau,t} = 1$ эффективность использования факторов производства в году «t» по отношению к году «τ» не изменилась. Временной интервал [t, τ] интервала/периода времени [t₀, t_L] будем называть подпериодом.

Мультипликативная декомпозиция [14, 15] $MI_j^{\tau,t}$ функционирования j-го DMU включает составляющие, характеризующие «технические/технологические изменения» (TECHnical Change, *TECCH*), «изменение чистой эффективности» (Pure Efficiency CHange, *PECH*), «изменение эффективности масштаба» (Scale Efficiency CHange, *SECH*):

$$MI_j^{\tau,t} = TECCH_j^{\tau,t} \times EFFCH_j^{\tau,t} = TECCH_j^{\tau,t} \times PECH_j^{\tau,t} \times SECH_j^{\tau,t} \quad (6)$$

$$TECCH_j^{\tau,t} = \left[\frac{E_j^\tau(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}}{E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}} \frac{E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}}{E_j^t(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}} \right]^{-0,5}, \quad (7)$$

$$PECH_j^{\tau,t} = \frac{E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}}{E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}}, \quad (8)$$

$$SECH_j^{\tau,t} = \frac{SE_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}}{SE_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}}, \quad (9)$$

где

$$SE_j^t(x_{j,t}, y_{j,t}) = \frac{E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}}{E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{CRS}}; SE_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau}) = \frac{E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}}{E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{CRS}}.$$

Здесь $E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{VRS}$, $E_j^t(x_{j,t}, y_{j,t})_{CRS}$ – показатели эффективности (2) функционирования j -го

DMU при переменном ($\lambda_j \geq 0$, VRS) и постоянном ($\sum_{j=1}^N \lambda_j = 1$, CRS) масштабе отдачи используемых ресурсов для года « t », Для базисного года « τ » $E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{VRS}$, $E_j^\tau(x_{j,\tau}, y_{j,\tau})_{CRS}$ определяют

аналогично (3). Компонента $TECCH_j^{\tau,t}$, характеризующая технические/технологические изменения в используемых DMU $_j$ способах преобразования «входов» в «выходы», отражает влияние и развитие научно-технического прогресса в предметной области. $EFFCH_j^{\tau,t}$ характеризует операционную эффективность функционирования DMU $_j$, т. е. эффективность организации процессов его менеджмента и влияние непосредственно масштабов DMU $_j$ на его деятельность. Вследствие этого $EFFCH_j^{\tau,t}$ представляется произведением двух компонент – $PECH_j^{\tau,t}$ и $SECH_j^{\tau,t}$. Компоненту $PECH_j^{\tau,t}$ достаточно часто используют для характеристики влияния на значения $MI_j^{\tau,t}$ результативности управленческой деятельности менеджмента DMU $_j$ в году « t » по отношению к году « τ ». Компонента $SECH_j^{\tau,t}$ отражает потенциальный прирост значения $MI_j^{\tau,t}$ от достижения DMU $_j$ в году « t » по отношению к году « τ » размера/масштаба, близкого к «оптимальному масштабу», который соответствует построенному DEA-методом для его группы на ГПВ. «Оптимальный размер/масштаб» для DMU $_j$ характеризуется целевыми расчетными значениями «входов» и «выходов», определяемыми при идентификации ГПВ.

Интерпретация значений величин $TECCH_j^{\tau,t}$, $PECH_j^{\tau,t}$, $SECH_j^{\tau,t}$ аналогична интерпретации значений $MI_j^{\tau,t}$. Оценка значений $MI_j^{\tau,t}$, $TECCH_j^{\tau,t}$, $EFFCH_j^{\tau,t}$, $PECH_j^{\tau,t}$, $SECH_j^{\tau,t}$ осуществлялась с помощью свободно распространяемого программного обеспечения DEAP 2.1 (<https://economics.uq.edu.au/cera/software>) [15]. Для упрощения записей в дальнейшем предлагается использовать следующие обозначения: $MI_j^{\tau,t} = MI_j$, $EFFCH_j^{\tau,t} = EFFCH_j$, $TECCH_j^{\tau,t} = TECCH_j$, $PECH_j^{\tau,t} = PECH_j$, $SECH_j^{\tau,t} = SECH_j$. Для средних значений по группе рассматриваемых DMU указанных величин нижний индекс « j » будет отсутствовать.

Статистические данные, характеризующие деятельность этих DMU, регулярно публикуются на сайте Департамента здравоохранения ХМАО-Югра (<https://dzhmao.admhmao.ru/statisticheskaya-informatsiya/>). Всего публикуются данные о деятельности 22 DMU ($N = 22$). В качестве входных $x_{k,j,t}$ были приняты следующие показатели в пересчете на 10 000 чел. населения административно-территориального образования округа:

- суммарная численность медицинского персонала (врачи и медицинские специалисты со средним образованием) ($k = 1$);
- общее количество коек в медицинских учреждениях ($k = 2$);
- обеспеченность амбулаторно-поликлиническими учреждениями (посещений в смену на конец года) ($k = 3$);
- общая площадь медицинских учреждений ($k = 4$).

Выходными же для рассматриваемых DMU были приняты следующие показатели:

- число врачебных посещений без учета работы врачей СМП (в тысячах) ($i = 1$);
- объем стационарной помощи по числу проведенных больными койко-дней ($i = 2$).

Рассматривался временной период с 2013 по 2021 г.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены расчетные значения индекса Малмквиста для медицинских учреждений ХМАО-Югра за период с 2013 по 2021 г.

Расчетные значения индекса Малмквиста (M_j) (6) для МУ ХМАО-Югра за период с 2013 по 2021 г.

Таблица 1

Calculated values of the Malmquist index (M_j) (6) for the KhMAO-Yugra municipal district for the period from 2013 to 2021

Table 1

j	Муниципальные районы и городские округа	Временные подпериоды							
		2013–2014	2014–2015	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019	2019–2020	2020–2021
1	Белоярский район	0,959	0,955	0,897	0,962	1,011	0,904	0,84	0,954
2	Березовский район	1,011	1,041	0,883	1,052	1,02	0,865	0,831	0,882
3	Кондинский район	1,224	0,950	0,948	1,021	1,004	0,908	0,729	0,962
4	Нефтеюганский район	1,154	0,957	0,974	1,026	0,996	0,95	1,029	0,825
5	Нижневартовский район	1,072	1,042	0,904	1,025	0,972	0,936	0,785	0,912
6	Октябрьский район	1,066	1,279	0,833	1,112	0,939	0,84	0,866	0,631
7	Советский район	0,964	0,983	0,982	0,948	1,03	0,85	0,999	0,908
6	Сургутский район	1,151	0,967	0,865	1,109	0,939	1,105	0,971	0,978
9	Ханты-Мансийский район	1,007	0,698	0,98	1,078	0,993	0,926	0,683	0,985
10	г. Когалым	1,231	0,981	0,726	1,139	1,112	0,982	0,758	1,078
11	г. Лангепас	1,155	0,918	0,975	1,003	1,05	0,972	0,89	1,193
12	г. Мегион	0,979	0,979	0,914	1,012	0,912	0,952	0,813	0,914
13	г. Нягань	1,018	0,974	0,995	0,965	1,028	0,99	0,964	0,328
14	г. Покачи	1,312	0,911	0,922	1,05	0,928	0,987	0,716	1,149
15	г. Пыть-Ях	1,019	0,950	0,982	1,012	0,976	1,064	0,882	1,028
16	г. Радужный	1,086	0,965	0,988	0,943	0,972	0,949	0,715	0,942
17	г. Урай	1,195	0,985	0,893	1,006	0,989	0,974	0,713	1,183
18	г. Югорск	1,12	0,919	1,032	0,982	1,03	0,991	0,847	1,056
19	г. Нефтеюганск	1,173	0,952	0,773	0,963	0,841	1,075	0,823	1,01
20	г. Нижневартовск	0,969	0,942	0,922	1,036	0,999	0,976	0,858	1,026
21	г. Сургут	1,033	0,942	1,083	0,875	1,003	0,996	0,891	1,036
22	г. Ханты-Мансийск	1,049	1,003	1,087	0,936	1,005	0,972	0,926	0,997

Расчетные значения M_j из табл. 1 достаточно разнородны. Среди МУ ХМАО-Югра отсутствуют такие, у которых на протяжении наблюдаемого временного интервала все расчетные значения M_j были либо только больше «1», либо только меньше «1». В табл. 2 для каждого временного подпериода приведено количество МУ ХМАО-Югра, характеризующееся расчетными значениями M_j (6), $TECCH_j$ (7), $EFFCH_j$ (6), $PECH_j$ (8), $SECH_j$ (9), которые «> 1» (прогрессирующие значения), «= 1» (постоянные значения) и «< 1» (регрессирующие значения).

В течение рассматриваемого временного периода с 2013 по 2021 г. отсутствуют МУ ХМАО-Югра, для которых $M_j = 1$. В свою очередь, количество МУ, для которых $M_j > 1$, в рассматриваемом временном периоде варьируется в достаточно широком диапазоне – от 82 до 4,5 %. Последнее значение относится к подпериоду 2019–2020 гг. и обусловлено активной фазой пандемии. Среди всех рассматриваемых временных подпериодов преобладают МУ со значением $M_j < 1$. Исключение составляют подпериоды 2013–2014 гг. и 2014–2015 гг., где количество МУ с $M_j < 1$ менее 20 %, в остальные же подпериоды количество этих МУ колеблется от 36 до 95 %. Количество МУ ХМАО-Югра с $TECCH_j = 1$ только в трех временных подпериодах не равно нулю, но количество таких МУ не превышает 10 %. Число МУ ХМАО-Югра с $TECCH_j > 1$ характеризуется

значительной изменчивостью, колеблясь от 0 до почти 60 %. В течение же всего временного периода для МУ преобладает величина $TECCH_j < 1$, при этом их количество колеблется в диапазоне от 36 до 100 %. Компоненту $PECH_j$, как правило, используют для оценки эффективности работы менеджмента – административно-управленческого персонала (АУП) МУ ХМАО-Югра и соответственно ее влияния на значение индекса Малмквиста. Так, не менее 60 % МУ в течение всего периода имеют нейтральное значение $PECH_j = 1$, т. е. АУП МУ функционирует устойчиво, используя наработанные практики управления вверенным медицинским учреждениям. Только в четырех временных подпериодах эффективность работы менеджмента АУП МУ снижается, наиболее заметно это происходит в 2019–2020 гг., что обусловлено влиянием пандемии COVID. Но уже в следующем подпериоде 2020–2021 гг. АУП МУ адаптировался к условиям пандемии и доля МУ с $PECH_j < 1$ существенно снизилась. Следует отметить, что количество МУ с $PECH_j > 1$ присутствует в половине рассматриваемых временных подпериодов, несмотря на их незначительное количество – от 5 до 13 % от общего числа МУ. Это говорит о перманентной работе АУП МУ над совершенствованием методов управления и повышению эффективности своей деятельности.

Таблица 2
Количество МУ ХМАО-Югра с прогрессирующими, постоянными и регрессирующими значениями показателей MI_j , $TECCH_j$, $EFFCH_j$, $PECH_j$, $SECH_j$ для каждого двухгодичного временного подпериода

Table 2
The number of medical institutions in KhMAO-Yugra with progressive, constant and regressive values of indicators MI_j , $TECCH_j$, $EFFCH_j$, $PECH_j$, $SECH_j$ for each two-year time subperiod

Количество МУ и вид изменений	Временные подпериоды							
	2013–2014	2014–2015	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019	2019–2020	2020–2021
MI								
МУ	22	22	22	22	22	22	22	22
$MI_j > 1$	82	82	13,6	63,6	45,5	13,6	4,5	40,9
$MI_j < 1$	18	18	86,4	36,4	55,5	86,4	95,5	59,1
$MI_j = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0
TECCH								
МУ	22	20	22	22	21	22	22	21
$TECCH_j > 1$	59 %	36,4 %	0 %	50 %	59,1 %	9,1 %	0 %	36,4 %
$TECCH_j < 1$	41 %	54,5 %	100 %	50 %	36,4 %	90,9 %	100 %	59,1 %
$TECCH_j = 1$	0 %	9,1 %	0 %	0 %	4,5 %	0 %	0 %	4,5 %
EFFCH								
МУ	16	13	14	13	16	16	16	15
$EFFCH_j > 1$	50 %	4,5 %	45,5 %	31,8 %	18,2 %	27,3 %	22,7 %	36,4 %
$EFFCH_j < 1$	22,7 %	54,5 %	18,2 %	27,3 %	54,5 %	45,5 %	50 %	31,8 %
$EFFCH_j = 1$	27,3 %	41 %	36,4 %	40,9 %	27,3 %	27,3 %	27,3 %	31,8 %
PECH								
МУ	9	8	9	5	7	8	9	10
$PECH_j > 1$	27,3 %	9,1 %	31,8 %	13,6 %	4,5 %	13,6 %	9,1 %	31,8 %
$PECH_j < 1$	13,6 %	27,3 %	9,1 %	9,1 %	27,3 %	22,7 %	31,8 %	13,6 %
$PECH_j = 1$	59,1 %	63,6 %	59,1 %	77,4 %	68,2 %	63,7 %	59,1 %	54,6 %
SECH								
МУ	16	13	14	13	16	16	16	14
$SECH_j > 1$	54,5 %	9,1 %	36,4 %	31,8 %	27,3 %	31,8 %	31,8 %	27,3 %
$SECH_j < 1$	18,2 %	50 %	27,3 %	27,3 %	45,5 %	40,9 %	40,9 %	36,4 %
$SECH_j = 1$	27,3 %	40,9 %	36,4 %	40,9 %	27,2 %	27,3 %	27,3 %	36,3 %

Компонента $SECH$ разложения MI и ее значения характеризуют влияние изменений «масштаба/размеров» МУ на значения индекса Малмквиста. Так, количество МУ с $SECH_j = 1$ составляет минимум 27 % в половине временных подпериодов, т. е. масштаб МУ «оптимален» и не ока-

зывает влияния на MI. «Рост влияния изменений масштаба» ($SECH_j > 1$), т. е. приближение масштаба МУ к оптимальному снизу, наблюдается в среднем не более чем у 32 % МУ в течение всего временного периода. Количество МУ с $SECH_j < 1$ – «уменьшение масштаба», т. е. приближение масштаба МУ к оптимальному – присутствует в течение всего временного интервала и колеблется в диапазоне от 9 до 54 %. Компонента $EFFCH_j$ представляет собой коммутативность компонент $PECH_j$ и $SECH_j$. Количество МУ с $EFFCH_j = 1$ отражает динамику их количества с компонентой $SECH_j = 1$. Во всех временных подпериодах число медицинских учреждений с $EFFCH_j > 1$ характеризуется большой волатильностью, которая по своему виду близка к динамике количества МУ с $SECH > 1$. Динамика количества МУ с $EFFCH_j < 1$ также находится под влиянием динамики количество МУ со значением $SECH_j < 1$. В трех временных подинтервалах количество МУ с $EFFCH_j < 1$ не превышает 32 %, а в остальных подинтервалах их численность колеблется от 45 до 55 %. Средние значения индекса Малмквиста для каждого временного подинтервала характеризуют изменения медицинской эффективности деятельности всей системы здравоохранения округа, а средние значения компонент разложения MI, в свою очередь, характеризуют соответствующие им аспекты функционирования данной системы. В табл. 3 представлены средние расчетные значения MI, TECCN, EFFCH, PECH и SECH по всем МУ ХМАО-Югра для рассматриваемых временных подпериодов.

Таблица 3
Средние значения индекса Малмквиста (MI) для всех МУ ХМАО-Югра и расчетные средние значения компонент его разложения для двухгодичных подпериодов с 2013 по 2021 г.

Table 3
Average values of the Malmquist index (MI) for all municipalities of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra and calculated average values of the components of its decomposition for two-year subperiods from 2013 to 2021

№	Компоненты разложения индекса Малмквиста	Временные подпериоды							
		2013–2014	2014–2015	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019	2019–2020	2020–2021
1	MI	1,084	0,963	0,930	1,010	0,987	0,960	0,837	0,928
2	TECCN	1,048	1,007	0,901	1,002	0,998	0,971	0,879	0,933
3	EFFCH	1,034	0,957	1,032	1,008	0,989	0,988	0,952	0,994
4	PECH	1,018	0,988	1,011	1,005	0,987	0,992	0,961	1,014
5	SECH	1,016	0,969	1,021	1,003	1,002	0,996	0,990	0,981

На рис. 1 совместно представлены графики изменения средних расчетных значений (см. табл. 3) компонент TECCN и EFFCH, а также индекса Малмквиста в период с 2013 по 2021 г. Динамика средних значений индекса Малмквиста (MI) (далее «значения») носит неустойчивый характер, демонстрируя снижение на 10 % в подпериоде 2015–2016 гг. и более чем на 12 % в подпериоде 2019–2020 гг. После каждого снижения значения MI возрастают, восстанавливая уровни значений, близкие к предыдущим. Наибольшее влияние на изменения MI оказывают значения компоненты индекса TECCN, характеризующей влияние технологического прогресса в предметной области. Изменения TECCN и MI практически синхронны. Интенсивное снижение TECCN и MI наблюдается в подпериод с 2019 по 2020 г., т. е. во время активной фазы пандемии COVID, когда еще не были сформированы соответствующие протоколы лечения и компания вакцинации не приобрела массовый характер. Но уже в подпериод 2020–2021 гг. ситуация существенно улучшилась, что нашло отражение в росте значения TECCN и MI.

Значения компоненты EFFCH индекса Малмквиста в подпериод 2015–2016 гг., где снижаются значения самого индекса и компоненты TECCN, находятся в противофазе, т. е. показывают рост. В дальнейшем же до подпериода 2019–2020 гг. значения EFFCH демонстрируют понижающийся тренд, прерываемый ростом значений в следующем интервале. Компонента EFFCH представляет собой мультипликатор двух компонент PECH и SECH (рис. 2), характеризуя организационно-управленческий аспект эффективности функционирования МУ. Значения PECH, характеризующие эффективность работы менеджмента рассматриваемых МУ, незначительно колеблются вблизи «1», что «говорит» о принятии и реализации достаточно рациональных управленческих решений при функционировании МУ. Данная ситуация вполне объяснима накопленным опытом административно-управленческого аппарата медицинских учреждений и обязатель-

ным использованием достаточно жестких регламентов и протоколов по организации оказания медицинских услуг населению. Исключением является период 2019–2020 гг., соответствующий пандемии COVID, когда требовалось принятие неординарных организационно-управленческих решений как по противодействию непосредственно пандемии, так и по обеспечению предоставления стандартных медицинских услуг населению. Значения РЕСН подпериода 2020–2021 гг. отражают не только достаточно оперативную адаптацию АУП МУ к условиям пандемии, но и результаты применения новых практик в управлении МУ в этих сложных условиях.

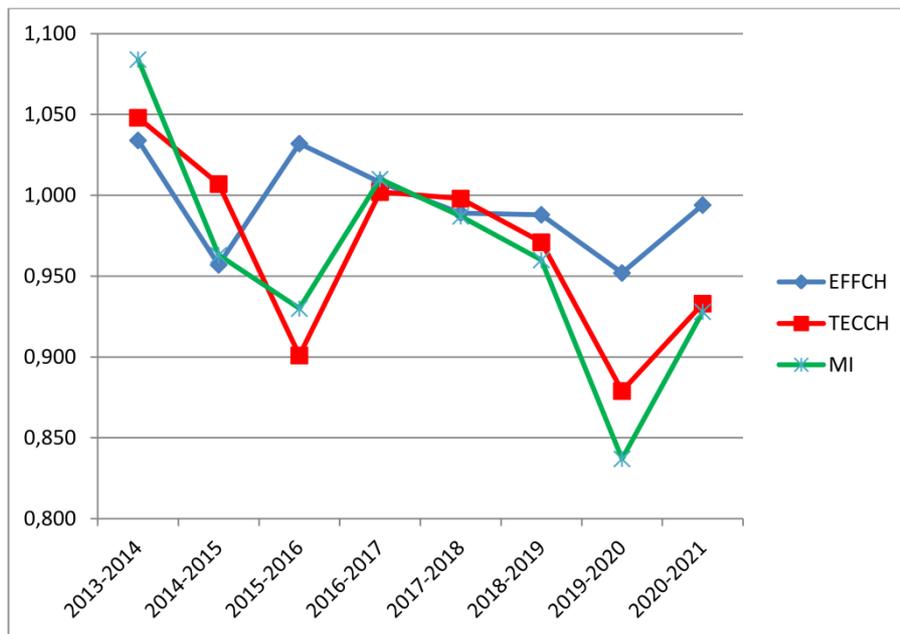


Рис. 1. Диаграмма изменений расчетных значений индекса Малмквиста и средних значений его компонент TECCH и EFFCH для МУ ХМАО-Югра в период с 2013 по 2023 г.
 Fig. 1. Diagram of changes in the calculated values of the Malmquist index and the average values of its components TECCH and EFFCH for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra municipality in the period from 2013 to 2023

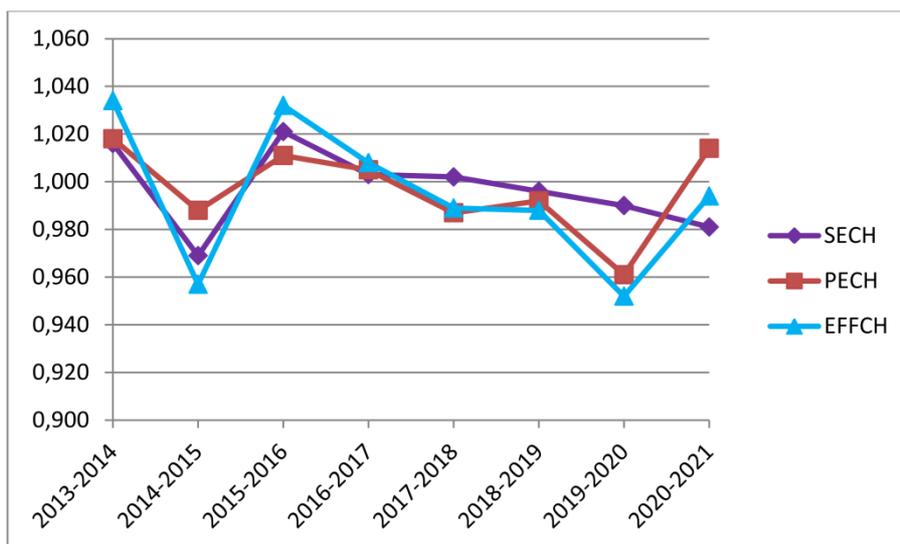


Рис. 2. Диаграмма изменений расчетных средних значений компонент EFFCH, PECH и SECH для МУ ХМАО-Югра в период с 2013 по 2023 г.
 Fig. 2. Diagram of changes in the calculated average values of the EFFCH, PECH and SECH components for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra municipal district in the period from 2013 to 2023

Изменение SECH, характеризующей влияние эффективности масштаба DMU, в подпериод с 2013 по 2016 г. носит достаточно волатильный характер, а с 2016 г. наблюдается устойчивое снижение расчетных значений SECH. Это говорит о том, что размеры/масштабы DMU из рассматриваемой группы уменьшаются по отношению к изменениям оптимальных масштабов виртуального объекта, соответствующего построенной ГПВ, в течение наблюдаемого временного интервала. Снижение значений SECH с 2019 г. обусловлено, в первую очередь, изменением условий предоставления медицинских услуг в условиях пандемии, что привело к снижению их объемов, которые являются «масштабными» показателями DMU.

Заключение и выводы

Использование индекса Малмквиста при исследовании динамики медицинской эффективности функционирования медицинских учреждений региона позволяет оценить изменения данного показателя в целом при принятом наборе их входных и выходных показателей. Декомпозиция индекса Мальмквиста на компоненты характеризует влияние на его значения изменений в технологии (ТЕСЧ), используемой DMU для преобразования входных показателей в выходные, эффективности принимаемых менеджментом DMU организационно-управленческих решений (РЕСЧ) и изменений масштабов DMU (SECH) на протяжении наблюдаемого временного периода. Компонента ТЕСЧ характеризует влияние на значение MI изменений в технологии или способах преобразования «входов» в «выходы». Поскольку оказание медицинских услуг населению осуществляется с использованием достаточно жестких правил, регламентов и протоколов лечения, то причиной существенных колебаний значений ТЕСЧ в подпериодах являются изменения таких входных показателей, как численность медицинского персонала и обеспеченность населения амбулаторно-поликлиническими отделениями/учреждениями. Остальные входные показатели характеризуются либо постоянством, либо крайне незначительной волатильностью значений. Медицинский персонал непосредственно реализует технологии лечения, а амбулаторно-поликлинические отделения/учреждения осуществляют диагностику потенциальных пациентов, определяя возможности применения тех или иных технологий лечения. Снижение указанных входных показателей негативно сказывается на значениях компоненты ТЕСЧ. Количественные оценки значений компоненты РЕСЧ дают возможность анализировать эффективность работы администрации МУ по организации предоставления медицинских услуг, выявлять «носителей лучших управленческих практик» и определять те МУ, на которые целесообразно эти практики распространить для улучшения их функционирования. Динамика значений компоненты SECH в течение наблюдаемого временного интервала характеризует близость масштабов (входные и выходные показатели) каждого МУ группы к «оптимальному DMU». Вместе с тем входные показатели директивно регламентируются нормативами Минздрава РФ и являются объектами мониторинга со стороны местных департаментов здравоохранения. Это «не позволяет» рассматривать ни положительные, ни отрицательные значения SECH как рекомендации к изменению этих показателей. Изменения же выходных показателей, которые характеризуют объемы предоставленных медицинских услуг, также не всегда могут быть изменены, так как напрямую определяются болезненностью прикрепленного к МУ населения административного образования. Вместе с тем значения компонент разложения индекса Малмквиста отражают влияние на медицинскую эффективность рассматриваемых медицинских учреждений серьезных изменений их внешней среды функционирования, вызванных пандемией COVID. Все значения компонент и самого индекса в подпериод 2019–2020 гг. претерпели существенное снижение. Однако в подпериод 2020–2021 гг. значения компонент ТЕСЧ и РЕСЧ выросли, что объясняется и использованием новых протоколов лечения, и достаточно быстрой адаптацией АУП МУ к условиям пандемии. Стагнация значений компоненты SECH в интервале 2019–2021 гг. обусловлена действовавшими ограничениями на предоставление типовых медицинских услуг населению.

Список литературы

1. Бессонова Е.В. Анализ динамики совокупной производительности факторов на российских предприятиях (2009–2015 гг.) // Вопросы экономики. 2018. № 7. С. 96–118. DOI: 10.32609/0042-8736-2018-7-96-118
2. Широ́в А.А. Использование таблиц «затраты-выпуск» для обоснования решений в области экономической политики // Проблемы прогнозирования. 2018. № 6 (171). С. 12–25.
3. Подхалузина В.А. Функционально-стоимостной анализ и его отличия от традиционных методов анализа // Балтийский экономический журнал. 2017. № 3 (19). С. 56–62.
4. Курнакина Н.В. Методика комплексной оценки эффективности деятельности медицинской организации за год // Инновации и инвестиции. 2017. № 2. С. 137–140.
5. Яшина Н.И., Хансуварова Е.А., Яшин К.С. Разработка методических аспектов оценки эффективности деятельности лечебно-профилактических учреждений // Управленец. 2016. № 4 (62). С. 26–33.
6. Федотов Ю. В., Яблонский К. П., Виталюева М. А. Анализ границ производственных возможностей и оценка организационной эффективности в системе здравоохранения Санкт-Петербурга // Вестник СПбГУ. Менеджмент. 2017. Т. 16, вып. 4. С. 471–506.
7. Evaluation of Hospital Medical Service Efficiency in Sichuan Province Based on DEA / D.R. Zhao, H.M. Tang, X.P. Zhao et al. // Health Soft Science. 2018. Vol. 32. P. 49–53.
8. Данилов А.В. Реструктуризация региональной системы оказания стационарной медицинской помощи на основе средств инструментального бенчмаркинга // Менеджер здравоохранения. 2019. № 9. С. 23–29.
9. Селамзаде Ф. Д. Оценка эффективности системы здравоохранения Российской Федерации с помощью оболочечного анализа данных: на примере республик // Научный журнал «GLOBUS»: Экономика и юриспруденция. 2021. Т. 7, № 1 (41). С. 7–20.
10. Кутышкин А.В., Шульгин О.В. Использование непараметрического анализа данных для оценки эффективности муниципальных медицинских учреждений региона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 57–66. DOI: 10.14529/ctcr230105
11. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Краткое описание метода Data Envelopment Analysis [Электронный ресурс]. URL: http://morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf (дата обращения: 11.04.2024).
12. Färe R., Grosskopf S., Norris M. Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries // American Economic Review. 1997. Vol. 84, iss. 5. P. 1040–1044.
13. Chen Y., Guan C.L. Study on the Allocation Efficiency of Health Resources in Chinese Traditional Medicine Hospitals Based on DEA-Malmquist Index // Modern Hospital Management. 2021. Vol. 19. P. 17–20.
14. Total productivity change of Health Centers in Greece in 2016–2018: a Malmquist index data envelopment analysis application for the primary health system of Greece / A. Trakakis, M. Nektarios, S. Tziaferi, P. Prezerakos // Cost Effectiveness and Resource Allocation. 2021. Vol. 19, iss. 1. P. 1–11. DOI: 10.1186/s12962-021-00326-z
15. Coelli T. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis Program // CEPA Working papers. 1996. Vol. 96, iss. 8. P. 1–50.

References

1. Bessonova E.V. Analysis of Russian firms' TFP growth in 2009–2015. *Voprosy Ekonomiki*. 2018;(7):96–118. (In Russ.) DOI: 10.32609/0042-8736-2018-7-96-118
2. Shirov A.A. [Using input-output tables to justify decisions in the field of economic policy]. *Problemy prognozirovaniya*. 2018;6(171):12–25. (In Russ.)
3. Podhalyuzina V.A. Cost-benefit analysis and its difference from traditional methods of analysis. *Baltic Economic Journal*. 2017;3(19):56–62. (In Russ.)
4. Kurnakina N.V. [Methodology for a comprehensive assessment of the effectiveness of a medical organization for a year]. *Innovacii i investicii*. 2017;2:137–140. (In Russ.)
5. Yashina N.I., Khansuvarova E.A., Yashin K.S. Development of Methodological Aspects of Assessing the Efficiency of Healthcare Institutions. *Upravlenets = The manager*. 2016;4(62):26–33. (In Russ.)

6. Fedotov Yu.V., Iablonskii K.P., Vitaliueva M.A. Production frontier analysis and organizational performance assessment in St. Petersburg healthcare system. *Vestnik of Saint-Petersburg university. Management*. 2017;16(4):471–506. (In Russ.)

7. Zhao D.R., Tang H.M., Zhao X.P. et al. Evaluation of Hospital Medical Service Efficiency in Sichuan Province Based on DEA. *Health Soft Science*. 2018;32:49–53.

8. Danilov A.V. Restructuring of a regional system of rendering stationary medical care on the basis of means of tool benchmarking. *Manager Zdravoochranenia*. 2019;(9):23–29. (In Russ.)

9. Selamzade F.D. Evaluation of the efficiency of the healthcare systems of the Russian Federation with data envelopment analysis: an example of republics. *Scientific journal "GLOBUS": Economics and Jurisprudence*. 2021;7(1(41)):7–20. (In Russ.)

10. Kutyshkin A.V., Shulgin O.V. Use of nonparametric data analysis for assessing the efficiency of municipal medical institutions of the region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):57–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230105

11. Morgunov E.P., Morgunova O.N. *Kratkoye opisaniye metoda Data Envelopment Analysis* [Brief description of the Data Envelopment Analysis method] [Electronic resource]. Available at: http://morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf (accessed 11 April 2024).

12. Färe R., Grosskopf S., Norris M. Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries. *American Economic Review*. 1997;84(5):1040–1044.

13. Chen Y., Guan C.L. Study on the Allocation Efficiency of Health Resources in Chinese Traditional Medicine Hospitals Based on DEA-Malmquist Index. *Modern Hospital Management*. 2021;19:17–20.

14. Trakakis A., Nektarios M., Tziaferi S., Prezerakos P. Total productivity change of Health Centers in Greece in 2016–2018: a Malmquist index data envelopment analysis application for the primary health system of Greece. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*. 2021;19(1):1–11. DOI: 10.1186/s12962-021-00326-z

15. Coelli T. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis Program. CEPA Working papers. 1996;96(8):1–50.

Информация об авторе

Кутышкин Андрей Валентинович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории имитационного моделирования, Нижневартковский государственный университет, Нижневартовск, Россия; avk_200761@mail.ru.

Information about the author

Andrey V. Kutyshkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Research Laboratory of Simulation Modeling, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia; avk_200761@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

The article was submitted 31.05.2024

Краткие сообщения

Brief reports

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr240310

MODELLING POLITICAL PROCESSES IN A MULTICRITERIAL SETTING

Ya.D. Gelrud, gelrudid@susu.ru

L.I. Shestakova, shestakovali@susu.ru

E.V. Gusev, gusevev@susu.ru

V.L. Kodkin, kodkinvl@susu.ru

V.I. Shiriaev, shiriaevvi@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. A political process is a complex management system that includes, for instance, economics, electoral processes, and ecology. To make decisions when managing such a system, it is necessary to use some rules that allow to intentionally choose the best or an acceptable option. Such rules are called performance criteria. This paper discusses problems that affect different aspects of the management systems of political processes, and when choosing a solution, it is necessary to evaluate options using several criteria. These are called multicriteria problems. They emerge in strategic planning of a system, its forecasting and development. **The goal of the study** is to consider methods and tools of solving multicriteria problems arising while managing political processes. We discuss mathematical methods that help discard solutions, which are, in all respects, worse than others, and choose a compromise option from the remaining ones. **Methods.** We analyzed various methods of choosing a compromise solution, their advantages and disadvantages, and identified their areas of use. First, we consider various options for condensing the criteria and illustrate their positive and negative sides. Then, we describe the procedure for constructing a set of Pareto optimal solutions. Another method is the method of successive concessions, which is a procedure for choosing a solution in a dialogue (interactive) setting. Finally, we describe a decision-making procedure based on the analytic hierarchy process. **Results.** The paper shows the effectiveness of applying mathematical methods to solve multicriteria problems in managing political processes. The paper concludes with an example of a solution of a management problem in accordance with all the requirements we consider. **Conclusion.** The use of mathematical modeling and methods to solve multi-criteria management problems helps politicians make efficient decisions in their work and provides them with communication tools by using professional mathematical language.

Keywords: mathematical modeling, multiplicity of efficiency criteria, Pareto efficiency, analytic hierarchy process

For citation: Gelrud Ya.D., Shestakova L.I., Gusev E.V., Kodkin V.L., Shiriaev V.I. Modelling political processes in a multicriterial setting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):111–123. DOI: 10.14529/ctcr240310

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ

Я.Д. Гельруд, gelrudid@susu.ru
Л.И. Шестакова, shestakovali@susu.ru
Е.В. Гусев, gusev@v@susu.ru
В.Л. Кодкин, kodkinvl@susu.ru
В.И. Ширяев, shiriaevvi@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Политические процессы представляют собой сложную систему организационного типа. Чтобы принять решение при управлении такой системой, необходимо использовать некоторые правила, позволяющие целенаправленно выбрать наилучший или допустимый вариант действий. Такими правилами являются критерии эффективности. В данной статье рассматриваются задачи, затрагивающие различные аспекты деятельности систем управления политическими процессами, причем при выборе решения возникает необходимость оценивать варианты, используя несколько критериев. Задачи такого рода называются многокритериальными. Они возникают при стратегическом планировании, прогнозировании и развитии системы. **Цель исследования.** Основной целью статьи является рассмотрение методов и средств решения многокритериальных задач при управлении политическими процессами. Рассмотрен математический аппарат, который помогает отбросить заведомо худшие варианты решений, по всем показателям уступающие другим, и выбрать из оставшихся компромиссный вариант. **Материалы и методы.** Проведен анализ различных методов выбора компромиссного решения, выявлены их достоинства и недостатки, определены области использования. Рассмотрены различные варианты свертки критериев, проиллюстрированы их положительные и отрицательные стороны. Описана процедура построения множества эффективных решений, оптимальных по Парето. Рассмотрена процедура выбора решения в диалоговом (интерактивном) режиме, использующая метод последовательных уступок. В заключение описана процедура принятия решений на основе метода анализа иерархий. **Результаты.** В статье показана эффективность применения математических методов решения многокритериальных задач в управлении политическими процессами. В конце статьи рассматривается пример решения управленческой задачи в соответствии со всеми перечисленными требованиями. **Заключение.** Использование математического моделирования и методов для решения многокритериальных управленческих задач в профессиональной деятельности политика позволяет повысить эффективность принимаемых им решений и обеспечивает его коммуникационными средствами за счёт использования профессионального математического языка.

Ключевые слова: математическое моделирование, множественность критериев эффективности, оптимальность по Парето, метод анализа иерархий

Для цитирования: Modelling political processes in a multicriterial setting / Ya.D. Gelrud, L.I. Shestakova, E.V. Gusev et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 111–123. DOI: 10.14529/ctcr240310

Introduction

Despite the complex nature of the tasks of managing political processes, politicians have been going on by trial and error for a long time, relying on their mind, common sense and intuition. Mind and intuition are by all means important, but at present the complexity of political processes, their intensity, the social price of wrong decisions stimulate the authorities to be guided by a more modern and reliable methodology when making decisions. The achievements of foreign authors in this field are described in sufficient detail in [1, 2]. Unfortunately, we have to state that the achievements of Russian scientists in the area in question are significantly more modest. Firstly, our country began to implement mathematical methods and informatization into managing complex organizational systems later than others.

In addition, dogmatism, inherited from the Soviet time, and, all too often, absurd secrecy in political decision-making created enormous difficulties for studying and implementing methods of modeling into political work.

Nevertheless, the findings of recent years [3–6] should be regarded as a significant contribution into the development of the methodology of political and social sciences.

In political science as an area of organizational management, management has specific characteristics associated with high risks, uncertainty and incomplete information. In this area, it is impossible to conduct experiments to obtain an optimal solution, since political and social environment cannot be returned to its original state due to the irreversibility of political processes. Therefore, it is necessary to use mathematical modeling, which consists in studying not the object itself, but a mathematical problem that is in objective correspondence with the object being analyzed, in order to obtain the necessary information about it. Mathematical models and their application for solving management problems in social, economic and organizational systems are presented in [7–10]. This article discusses issues that affect different aspects of political process management systems, and when choosing a solution, it is necessary to evaluate options using several criteria. Such tasks are called **multicriterial**. They emerge in strategic planning, forecasting and development of a system. The examples of multicriterial problems described in literature are mainly related to economic systems [11–15], but we will analyze methods of multicriterial optimization and make recommendations for their use in political science. Let us consider, for example, the development program of a certain region. What is specifically meant by effective development in this case? What criterion should be used to choose the solution? First of all, it is desirable to maximize the number of jobs, average wages, and the gross output of enterprises in the region. It would also be beneficial to improve the environmental situation and the quality of consumer services, increase the level of self-government and political activity, etc.

As for budget expenditures, it would be a good idea to minimize them, and maximize the well-being of the region's population. Additional criteria may arise when solving this problem.

Such multiplicity of efficiency criteria (let us denote them as F_1, F_2, \dots, F_n), taking numerical values that are desirable to maximize or minimize, is called *multicriteriality*. This situation is quite typical when modeling political processes.

Is it possible to find a solution that meets all the criteria at once? The problem is not solved generally. The criteria are mostly contradictory, and finding the extremum of one does not entail simultaneous conversion to the extremum of the others. Therefore, the often declared slogan ‘to achieve the maximum effect at a minimum cost’ is a false phrase which cannot be of scientific interest.

How, if necessary, to evaluate efficiency and develop a solution with several criteria? Let us discuss the appropriate methods in this article.

The article has the following structure. In addition to the Introduction section, the first section presents the methods of combining many criteria into one integrated one which are called methods of aggregating criteria, section 2 discusses the concept and procedure for choosing Pareto-optimal solutions. Section 3 provides a dialog method for solving multi-criteria problems. The fourth section sets out the method of successive assignments. Section 5 discusses decision-making processes based on the hierarchy analysis method, and details an example of how to solve the problem of selecting a project when developing and implementing a program of execution of a national project in a federal subject. In conclusion, recommendations are made on the use of multicriterial optimization methods to solve problems of political process management.

1. Criteria aggregation methods

There are many ways to lead a multi-criteria problem to a single-criterion problem, at the same time a generalized (integral) function of given criteria, which is considered as a decision criterion, is defined. Often such a criterion is written as a fraction, in the numerator of which there are values that need to be increased, and in the denominator – those that need to be reduced. For example, the average salary, the quality of consumer services of the population – in the numerator, and budget expenditures – in the denominator.

The method of such aggregation of criteria does not provide an optimal solution, as when applied, it is assumed that the deterioration under one criterion is compensated by improving the other; in the general case, this is not true. As an example, let us consider the criterion that Leo Tolstoy proposed for

assessing a person. This criterion is presented in the form of a fraction, in the numerator of which there are objective assessments of human merits, and in the denominator – a subjective assessment (estimates are set, for example, according to the 5-point system).

$$\text{Criterion for assessing a man's merits} = \frac{\text{objective merits of a man}}{\text{their opinion of themselves}}. \quad (1)$$

At first glance, this approach seems logical. But if a person's assessment of their merits is not fair, while their opinion of themselves is even lower, then Leo Tolstoy's criterion will have great value!

We see that the use of the criterion in the form of a fraction (1) can lead to paradoxical conclusions.

Many use a different way of aggregating performance criteria, forming a 'weighted sum' in which each F_i criterion enters with a 'weight' q_i corresponding to its degree of importance:

$$F = q_1F_1 + q_2F_2 + \dots + q_nF_n, \quad (2)$$

where weight $q_i > 0$ at F_i maximization, and weight $q_i < 0$ at F_i minimization.

With the arbitrary assignment of weights q_1, q_2, \dots, q_n , this method also cannot provide an objectively optimal solution. A person, making a decision in accordance with this criterion, must first attribute 'weight coefficients' to different indicators, but they depend on a person's preferences and can change according to the situation.

Let us illustrate this with an example. Rushing to work in the morning, a person considers the following options: taking a bus is cheap but takes a long time; taking a taxi is faster but the cost is significantly higher.

It makes a typical two-criteria decision-making problem. At the same time, it is necessary to minimize the first criterion, the cost of commuting P , and it is also necessary to minimize the second criterion, commuting time T . But these criteria are incompatible, when one decreases, the other one increases, but a compromise solution acceptable on both criteria must be reached. When making a decision, a person subconsciously uses a generalized indicator, weighing private criteria:

$$F = q_1P + q_2T \Rightarrow \min. \quad (3)$$

But coefficients q_1, q_2 depend on the situation and values P and T . If, for example, a person wanted to save one day and increased weight coefficient q_1 at P , and, at the same time, was late for work and received a reprimand, on another day he will increase weight coefficient q_2 at T . With an arbitrary assignment of weights q_1, q_2 , there is no guarantee to get an 'optimal' solution.

A more complex expression is often used:

$$F = \frac{q_1F_1 + q_2F_2 + \dots}{s_1Q_1 + s_2Q_2 + \dots}, \quad (4)$$

but this formula also has the disadvantages inherent in the previous methods.

In this case we encounter a typical technique – there is a transfer of arbitrariness from one method to another. Simply choosing a compromise solution, analyzing and comparing all the pros and cons of each alternative, seems not scientific enough and too arbitrary. But the use of a formula including coefficients $q_1, q_2, \dots, s_1, s_2, \dots$ is already considered 'science'! In fact, there is no science here, and you do not have to deceive yourself. It is impossible to completely get rid of subjectivity in multi-criteria tasks.

There are rare situations when the analysis of the criteria allows you to unambiguously choose the option that is best than the others by all odds. But in managerial tasks of choosing a solution is not usually obvious: with an improvement of one indicator, another one worsens.

Thus, it is generally impossible to get an optimal solution to a multi-criteria problem, and the mathematical methods only help to discard the admittedly inferior solution options, which are, in all respects, worse than others, and choose a compromise option from the remaining ones.

2. Pareto Optimality

Suppose there is a decision-making task with n criteria F_1, F_2, \dots, F_n and suppose it is necessary to maximize these criteria. We will make a pair comparison of possible alternatives. If for any pair of solutions y_1 and y_2 the values of indicators F_1, F_2, \dots, F_n for $y_1 \geq$ the values of the corresponding indicators for y_2 , and at least one value of the indicator is strictly larger, then solution y_1 is better than solution y_2 , in which case it is said that y_1 'dominates' y_2 . Then solution y_2 can be discarded but y_1 remains. Thus, after such a pairwise comparison and selection for further analysis, only 'Pareto-optimal' solutions

will remain over which there are no dominant solutions (Italian sociologist and economist V. Pareto, 1848–1923).

Consider an example of finding Pareto solutions. There is a task with criteria F_1 and F_2 that you would like to maximize. We denote possible solutions with x_1, x_2, \dots, x_k . We shall calculate values F_1, F_2 for each solution and put points with these coordinates on the Cartesian plane. Let us number the points according to the solution number (Fig. 1).

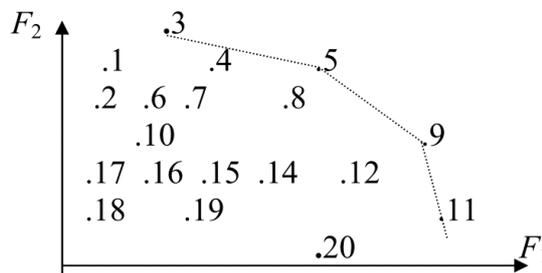


Fig. 1. Pareto optimality

Making a pairwise comparison of the solutions in Fig. 1, we see that x_3 dominates x_1 ; x_5 dominates x_4, x_8 ; x_9 dominates x_{12}, x_{20} , etc. Solutions x_3, x_5, x_9, x_{11} do not have dominant solutions, therefore they are Pareto-optimal. Such a selection significantly reduced the number of solutions, and a decision maker should choose a preferred option from them.

With three or more criteria, geometric interpretation is impossible, but the procedure for selecting Pareto solutions is similar – using the method of pairwise comparisons.

Let us consider an example of Finnish budgeting. The following criteria were used to select the solution:

- F_1 – increase in gross national product (GNP), %;
- F_2 – decrease in unemployment, %;
- F_3 – decrease in inflation, %;
- F_4 – decrease in trade deficit (DM billion).

The criteria values for the various budget options are shown in Table 1.

Table 1

Solution options and criteria values

Solution options	F_1	F_2	F_3	F_4
1	-2.76	3.27	8.14	2.23
2	0.54	2.83	9.06	5.26
3	1.85	2.65	8.84	6.55
Best criteria values	7.14	1.87	8.14	1.23

The optimal criteria values, when finding a solution and taking into account only one criterion, are given in the last line of Table 1. At the same time, these values are not achieved according to all the criteria. The options given in Table 1 are Pareto-optimal solutions in a task with four criteria, with none of them dominating the others. Thus, option 1 has the best indicator F_4 (trade deficit and inflation), but the worst in terms of unemployment and GNP growth. Option 3 is the best in terms of GNP growth and unemployment, but the worst in terms of trade deficit. Such contradictions are typical for multi-criteria tasks.

The choice of the final solution remains the prerogative of a person who, by virtue of his experience and qualifications, can take responsibility and make an acceptable compromise decision.

3. Dialog solution method

The decision selection process can take place in a dialog (interactive) mode, wherein the computer outputs the values of criteria F_1, F_2, \dots, F_n , and the decision maker, having analyzed the information, changes the parameters of the criteria calculations and repeats the calculations until a compromise solution is obtained.

While applying the dialog method, a multi-criteria problem is often reduced to a single-criterion one by selecting and optimizing one main criterion F_1 , while all the other criteria are limited to some acceptable values. For example, in strategic planning of the development of the region, you can minimize costs, while ensuring a given rate of growth in average wages, the number of jobs, the level of environmental safety, etc. With this method, all the criteria except the main one (costs) follow the specified restrictions. You can make adjustments to these constraints in a dialog mode.

4. Sequential concession method

In the dialog mode, *the sequential concession method* can be implemented. This method is used if criteria F_1, F_2, \dots, F_n can be ordered by their importance. The first step is a solution that optimizes the first most important criterion $F_1 = F_1^*$. At the second stage, some ‘concession’ is made; F_1 is changed by ΔF_1 and transformed to the restriction, after which optimization according to the second criterion F_2 is carried out. Further ΔF_2 ‘concession’ by criterion F_2 is similarly made, transition to optimization by F_3 is carried out and etc. This method allows you to immediately see in the process of solving a multi-criteria task which ‘concession’ according to one criterion makes another one win.

Once again, the choice of a solution of a multi-criteria task is not determined unambiguously. The decision maker, by analyzing the relevant data provided to him on the advantages and disadvantages of possible alternatives, makes the choice consciously, taking into account the specific situation and personal preferences.

5. Hierarchy Analysis Method

The point of this method is to represent a multi-criteria task in the form of a multi-level hierarchical structure consisting of criteria and alternatives. It is proposed by T. Saaty [11] and its distinctive feature is simplicity of examination of pairwise comparison of criteria and alternatives by the degree of preference. Priority vectors of relative importance of criteria against each other and relative importance of alternatives for each criterion are formed.

At the top level of the hierarchy there is the goal of solving the task, then come the criteria and alternatives.

The elements of each level are then compared in pairs. The dominance of the elements over each other is assessed by a nine-point scale (Table 2).

Table 2

Element importance ratio scale

Degree of importance a_{ij}	Preferences
1	The elements are equivalent
3	The element has some preference over the other
5	The element has a significant preference over the other
7	The element has a very strong preference over the other
9	The element has an absolute preference over the other
2, 4, 6, 8	Intermediate values
Reciprocal values $a_{ji} = 1/a_{ij}$	Element j , when compared to element i , has the reciprocal value

Assessments are carried out by experts using various methods: the arithmetic mean method, the median method, the Kemeny method, etc. The combination of methods produces a more objective result. There is a variety of reading matter on the application of expert methods [16–21].

As a result of this examination, square matrices of paired comparisons of dimension n are formed for each level of hierarchy $A = \{a_{ij}\}$, where n is the number of elements compared in pairs.

The eigenvectors of each pair comparison matrix (W^A) define priority vectors. They are calculated as follows:

– the matrix is normalized, with all its elements divided by the sum of the elements of the corresponding column. Then, the mean arithmetic values of the elements of each row of the normalized matrix, which are components of vector W^A , are calculated.

Each matrix A must be checked for the validity of expert opinions, for which *the maximum eigenvalue* λ_{\max} is found according to the following algorithm:

– matrix A is multiplied on the right by its own vector W^A , after which all the components of the formed vector are added.

The found value λ_{\max} is used to calculate the consistency index using the formula:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1). \quad (5)$$

The consistency index assesses the inconsistency of expert opinions when comparing the criteria and alternatives. Contradictions are associated with subjective errors of experts. A small number of inconsistencies correspond to a small consistency index value.

Then the consistency ratio $CR = CI/CC$ is calculated, where CC is the mathematical expectation (average value) of the consistency index of a randomly obtained matrix of pairwise comparisons. CC is approximately calculated by the following formula:

$$CC = \frac{1.98(n-2)}{n} \tag{6}$$

CR value should be ≤ 0.1 , at least ≤ 0.15 . Otherwise, the provided judgments of the experts should be rechecked.

Priority vectors are sequentially defined from the lower levels of the hierarchy to the upper levels.

Example. Let us consider the problem of choosing a project when developing and implementing a program for running a national project in the federal subject from three proposed options according to four criteria: Population Welfare, Ecological Condition, Number of Jobs and Cost. Let us construct a three-level structure of the alternatives and criteria, as shown in Fig. 2. The matrix of pairwise comparisons of criteria is given in Table 3.

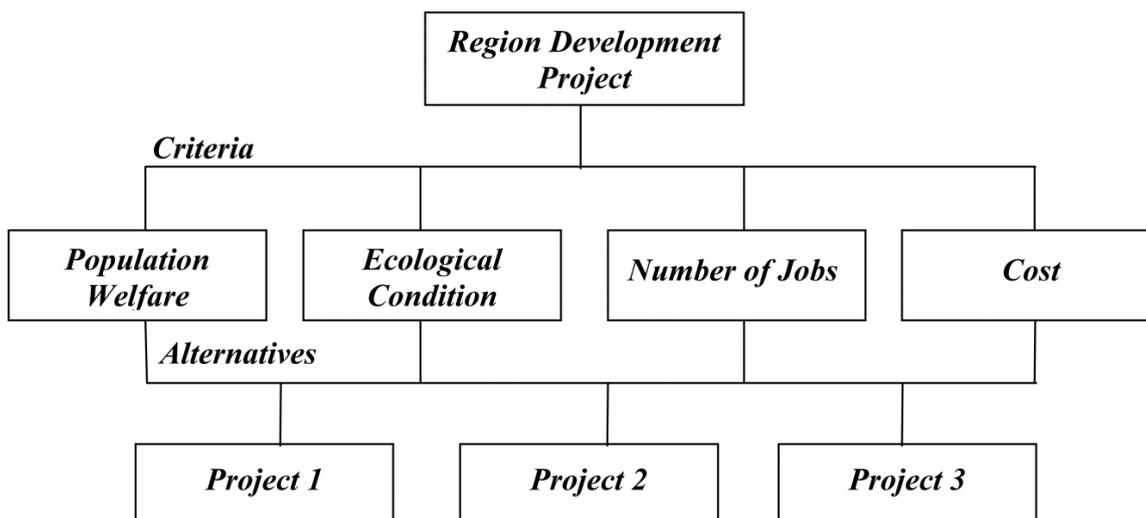


Fig. 2. Structure of alternatives and criteria

Table 3

Matrix of pairwise comparisons of criteria (A)

Region Development Project	Population Welfare	Ecological Condition	Number of Jobs	Cost
Population Welfare	1	5	2	1/3
Ecological Condition	1/5	1	1/3	1/4
Number of Jobs	1/2	3	1	1/6
Cost	3	4	6	1

Let us calculate λ_{max} by formula (5).

To do this, first let us normalize matrix A:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 2 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 1/2 & 3 & 1 & 1/6 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \end{pmatrix}; \quad N_A = \begin{pmatrix} 0.21 & 0.38 & 0.21 & 0.19 \\ 0.04 & 0.07 & 0.04 & 0.14 \\ 0.11 & 0.23 & 0.11 & 0.1 \\ 0.64 & 0.31 & 0.64 & 0.57 \end{pmatrix}.$$

Let us then calculate the components of eigenvector W^A .

$$w_{\text{Population Welfare}} = (0.21 + 0.38 + 0.21 + 0.19)/4 = 0.2475;$$

$$w_{\text{Ecological Condition}} = (0.04 + 0.07 + 0.04 + 0.14)/4 = 0.0725;$$

$$w_{\text{Number of Jobs}} = (0.11 + 0.23 + 0.11 + 0.1)/4 = 0.1375;$$

$$w_{\text{Cost}} = (0.64 + 0.31 + 0.64 + 0.57)/4 = 0.54.$$

$$\bar{w}_1 = 0.2475; \bar{w}_2 = 0.0725; \bar{w}_3 = 0.1375; \bar{w}_4 = 0.54.$$

$$[A]W^A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 2 & 0.33 \\ 0.2 & 1 & 0.33 & 0.25 \\ 0.5 & 3 & 1 & 0.17 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.2475 \\ 0.0725 \\ 0.1375 \\ 0.54 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0632 \\ 0.302 \\ 0.5705 \\ 2.3975 \end{pmatrix}.$$

Hence:

$$\lambda_{\max} = 1.0632 + 0.302 + 0.5705 + 2.3975 = 4.33333.$$

Let us investigate the consistency of the matrix.

Consistency Index:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.3 - 4}{4 - 1} = 0.1.$$

Consistency ratio:

$$CC = \frac{1.98(4 - 2)}{4} = 0.99;$$

$$CR = \frac{CI}{CC} = \frac{0.1}{0.99} = 0.1.$$

$CI \leq 0.1$, therefore, the consistency level of matrix A is acceptable.

Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Population Welfare is given in Table 4.

Table 4

Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Population Welfare (criterion P)

Population Welfare	Project 1	Project 2	Project 3
Project 1	1	5	3
Project 2	1/5	1	1/2
Project 3	1/3	2	1

Let us normalize matrix P:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{pmatrix}; N_P = \begin{pmatrix} 0.65 & 0.625 & 0.67 \\ 0.13 & 0.125 & 0.11 \\ 0.22 & 0.25 & 0.22 \end{pmatrix}.$$

$$w_{\text{project1}} = (0.65 + 0.625 + 0.67)/3 = 0.648;$$

$$w_{\text{project2}} = (0.13 + 0.125 + 0.11)/3 = 0.121;$$

$$w_{\text{project3}} = (0.22 + 0.25 + 0.22)/3 = 0.23.$$

$$\bar{w}_1 = 0.648; \bar{w}_2 = 0.121; \bar{w}_3 = 0.23.$$

$$[P]W^P = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 0.2 & 1 & 0.5 \\ 0.33 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.648 \\ 0.121 \\ 0.23 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.943 \\ 0.3656 \\ 0.6858 \end{pmatrix}.$$

$$\lambda_{\max} = 1.943 + 0.3656 + 0.6858 = 2.9944 \approx 3.$$

Let us investigate the consistency of the matrix:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{3-3}{2} = 0;$$

$$CC = \frac{1.98(3-2)}{3} = 0.66;$$

$$CR = \frac{CI}{CC} = 0.$$

Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Ecological Condition is given in Table 5.

Table 5
Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Ecological Condition (criterion J)

Ecological Condition	Project 1	Project 2	Project 3
Project 1	1	4	8
Project 2	1/4	1	6
Project 3	1/8	1/6	1

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 0.25 & 1 & 6 \\ 0.125 & 0.17 & 1 \end{pmatrix}; \quad N_J = \begin{pmatrix} 0.72 & 0.77 & 0.53 \\ 0.18 & 0.19 & 0.4 \\ 0.1 & 0.03 & 0.07 \end{pmatrix}.$$

$$w_{\text{project1}} = (0.72 + 0.77 + 0.53)/3 = 0.67;$$

$$w_{\text{project2}} = (0.18 + 0.19 + 0.4)/3 = 0.25;$$

$$w_{\text{project3}} = (0.1 + 0.03 + 0.07)/3 = 0.03.$$

$$\bar{w}_1 = 0.67; \quad \bar{w}_2 = 0.25; \quad \bar{w}_3 = 0.03.$$

$$[J] W^J = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 0.25 & 1 & 6 \\ 0.125 & 0.17 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.67 \\ 0.25 \\ 0.03 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.910 \\ 0.5975 \\ 0.1565 \end{pmatrix}.$$

$$\lambda_{\max} = 1.910 + 0.5975 + 0.1565 = 2.6637.$$

Let us investigate the consistency of the matrix:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{2.67-3}{2} = -0.165;$$

$$CR = \frac{CI}{CC} = \frac{-0.165}{0.66} = -0.25.$$

Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Number of Jobs is given in Table 6.

Table 6
Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Number of Jobs (criterion N)

Number of Jobs	Project 1	Project 2	Project 3
Project 1	1	6	1/3
Project 2	1/6	1	1/4
Project 3	3	4	1

$$N = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 0.33 \\ 0.17 & 1 & 0.25 \\ 3 & 4 & 1 \end{pmatrix}; \quad N_N = \begin{pmatrix} 0.24 & 0.54 & 0.21 \\ 0.04 & 0.09 & 0.15 \\ 0.72 & 0.4 & 0.63 \end{pmatrix}.$$

$$w_{\text{project1}} = (0.24 + 0.54 + 0.21) / 3 = 0.33;$$

$$w_{\text{project2}} = (0.04 + 0.08 + 0.15) / 3 = 0.09;$$

$$w_{\text{project3}} = (0.72 + 0.4 + 0.63) / 3 = 0.4375.$$

$$\overline{w_1} = 0.33; \quad \overline{w_2} = 0.09; \quad \overline{w_3} = 0.4375.$$

$$[N] W^N = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 0.33 \\ 0.17 & 1 & 0.25 \\ 3 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.33 \\ 0.09 \\ 0.44 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0152 \\ 0.2561 \\ 1.79 \end{pmatrix}.$$

$$\lambda_{\max} = 1.0152 + 0.2561 + 1.79 = 3.0613.$$

Let us investigate the consistency of the matrix:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.0613 - 3}{2} = 0.03;$$

$$CR = \frac{CI}{CC} = \frac{0.03}{0.66} = 0.05.$$

Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Cost is given in Table 7.

Table 7
Matrix of pairwise comparisons of alternatives according to Cost (criterion C)

Cost	Project 1	Project 2	Project 3
Project 1	1	4	7
Project 2	1/4	1	5
Project 3	1/7	1/5	1

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 0.25 & 1 & 5 \\ 0.14 & 0.2 & 1 \end{pmatrix}; \quad N_C = \begin{pmatrix} 0.72 & 0.76 & 0.54 \\ 0.18 & 0.19 & 0.39 \\ 0.1 & 0.04 & 0.08 \end{pmatrix}.$$

$$w_{\text{project1}} = (0.72 + 0.76 + 0.54) / 3 = 0.67;$$

$$w_{\text{project2}} = (0.18 + 0.19 + 0.39) / 3 = 0.25;$$

$$w_{\text{project3}} = (0.1 + 0.04 + 0.08) / 3 = 0.07.$$

$$\overline{w_1} = 0.67; \quad \overline{w_2} = 0.25; \quad \overline{w_3} = 0.07.$$

$$[C] W^C = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 0.25 & 1 & 5 \\ 0.14 & 0.2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.67 \\ 0.25 \\ 0.07 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.16 \\ 0.7576 \\ 0.2138 \end{pmatrix}.$$

$$\lambda_{\max} = 2.16 + 0.7576 + 0.2138 = 3.1314.$$

Let us investigate the consistency of the matrix:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.1314 - 3}{2} = 0.065;$$

$$CR = \frac{CI}{CC} = \frac{0.065}{0.66} = 0.09.$$

All the generated priority vectors are put into Table 8. The resultant vector is determined by multiplying the matrix composed of priority vectors of alternatives by a priority vector of criteria.

Table 8

The generated priority vectors

Region Development Project	Population Welfare	Ecological Condition	Number of Jobs	Cost	Resultant Vector
Criteria	0.2475	0.0725	0.1375	0.54	–
Project 1	0.648	0.67	0.33	0.67	0.61613
Project 2	0.121	0.25	0.09	0.25	0.1954
Project 3	0.23	0.03	0.4375	0.07	0.1571

Project 1: $0.2475 \cdot 0.648 + 0.0725 \cdot 0.67 + 0.1375 \cdot 0.33 + 0.54 \cdot 0.67 = 0.61613$.

Project 2: $0.2475 \cdot 0.121 + 0.0725 \cdot 0.25 + 0.1375 \cdot 0.09 + 0.54 \cdot 0.25 = 0.1954$.

Project 3: $0.2475 \cdot 0.23 + 0.0725 \cdot 0.03 + 0.1375 \cdot 0.4375 + 0.54 \cdot 0.07 = 0.1571$.

Project 1 is the best option when choosing a region development project.

The method of analyzing hierarchies can be used in various areas of political science for tasks related to forecasting electoral behavior, turnout, campaign costs, etc. Taking into account the influence of the unstable external environment, these tasks can highlight key areas of improving the quality of decisions made and make an expert assessment of their significance taking into account the specifics of interests and influences of the subjects of the analyzed political system.

Conclusion

The article shows that various multicriteria optimization methods provide many effective solutions to management problems. This leads to the need to apply and analyze the totality of the considered methods to select the best solution that can be used to improve political processes. The use of mathematical modeling and methods to solve multi-criteria management problems helps politicians make efficient decisions in their work and provides them with communication tools by using professional mathematical language.

References

- Potthoff H., Miller S. *The Social Democratic Party of Germany, 1848–2005*. Dietz; 2006. 496 p.
- Ackoff R.L. *Ackoff's Best: His Classic Writings on Management*. Wiley; 1999 г. 368 p.
- Vertakova Yu.V., Sogacheva O.V. *Issledovanie sotsial'no-ekonomicheskikh i politicheskikh protsessov* [Research of Socio-economic and Political Processes]. Moscow: KnoRus; 2012. 336 p. (In Russ.)
- Lavrinenko V.L., Putilova L.M. *Issledovanie sotsial'no-ekonomicheskikh i politicheskikh protsessov* [Research of socio-economic and political processes]. Moscow: Yurayt; 2019. 214 p. (In Russ.)
- Roy O.M. *Issledovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh i politicheskikh protsessov* [Research Studies of Socio-economic and Political Processes]. St. Petersburg: Piter; 2004. 258 p. (In Russ.)
- Pugachev V., Solovyev V. *Vvedenie v politologiyu* [Introduction to Political Science]. Moscow: Aspekt Press; 2002. 211 p. (In Russ.)
- Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Research of operations: Problems, principles, methodology]. Moscow: Nauka; 2010. 552 p. (In Russ.)
- Gel'rud Ya.D. *Metody issledovaniya v menedzhmente* [Research methods in the management]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2014. 282 p. (In Russ.)
- Kozlov V.N. *Sistemnyi analiz, optimizatsiya i prinyatie reshenii* [System analysis, optimization and decision-making]. Moscow: Prospekt; 2016. 176 p. (In Russ.)
- Ballod B.A. *Metody i algoritmy prinyatiya reshenii v ekonomike* [Methods and Algorithms of Decision-Making in Economics]. Moscow: Finansy i statistika; 2009. 224 p. (In Russ.)
- Saati T.L. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnoy svyazi: analiticheskie seti* [Decision-making at dependences and feedback: analytical networks]. Translated from English by O.N. Andreychikova; edition A.V. Andreychikov and O.N. Andreychikova. Moscow: URSS: Lenand; 2015. 357 p. (In Russ.)
- Ten A.V. Multiple-criteria Optimization as a Tool of Risk Management in Investment Activity. *Risk Management*. 2009;(4). (In Russ.)
- Metelkov A., Chebotarev A., Tsvetkova Yu. Multi-criteria optimization of targets-oriented plans of an organization. *Problems of Management Theory and Practice*. 2008;(3):90–99. (In Russ.)

14. Mikoni S.V. *Mnogokriterial'nyy vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ* [Multi-criteria selection on a finite set of alternatives]. St. Petersburg: Lan'; 2009. 270 p. (In Russ.)
15. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Lektsii po teorii i metodam mnogokriterial'noy optimizatsii* [Lectures on the Theory and Methods of Multi-criteria Optimization]. Moscow: Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University; 2006. 130 p. (In Russ.)
16. Kemeny J., Snell J. *Kiberneticheskoe modelirovanie. Nekotorye prilozheniya* [Cybernetic Modeling. Some Applications]. Moscow: Sovetskoe radio; 2007. 130 p. (In Russ.)
17. Zaytsev M.G., Varyukhin S.E. *Metody optimizatsii upravleniya i prinyatiya resheniy: primery, zadachi, keysy* [Methods for optimizing management and decision making: examples, tasks, cases]. Moscow: Delo ANKh; 2015. 640 p. (In Russ.)
18. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya reshenii* [Theory and Methods of Decision Making]. Moscow: Logos; 2000. 296 p. (In Russ.)
19. Litvak B.G. *Ekspertnaya informatsiya: metody polucheniya i analiza* [Expert Information: Methods of Derivation and Analysis]. Moscow: Radio i svyaz'; 2008. 398 p. (In Russ.)
20. Pankova L.A., Petrovskiy A.M., Shneyderman M.V. *Organizatsiya izucheniya i analiza ekspertnoy informatsii* [Organization of Examination and Analysis of Expert Information]. Moscow: Nauka; 2004. 120 p. (In Russ.)
21. Sidel'nikov Yu.V. *Teoriya i organizatsiya ekspertnogo prognozirovaniya* [Theory and Organization of Expert Forecasting]. Moscow: IMEMO; 1990. 195 p. (In Russ.)

Список литературы

1. Поттхофф Х., Миллер С. Социал-демократическая партия Германии, 1848–2005 гг. / пер. с англ. М. Кейна. Дитц, 2006.
2. Акофф Р.Л. Акофф о менеджменте / пер. с англ. Ю. Канского. СПб. [и др.]: Питер, 2002. 447 с. (Серия «Теория и практика менеджмента»).
3. Вертакова Ю.В., Согачева О.В. Исследование социально-экономических и политических процессов. М.: КноРус, 2012. 336 с.
4. Лавриненко В.Л., Путилова Л.М. Исследование социально-экономических и политических процессов. М.: Юрайт, 2019. 214 с.
5. Рой О.М. Исследования социально-экономических и политических процессов. СПб.: Питер, 2004. 258 с.
6. Пугачев В., Соловьев В. Введение в политологию. М.: Аспект Пресс, 2002. 211 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 2010. 552 с.
8. Гельруд Я.Д. Методы исследования в менеджменте. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. 282 с.
9. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. М.: Проспект, 2016. 176 с.
10. Баллод Б.А. Методы и алгоритмы принятия решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2009. 224 с.
11. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратной связи: аналитические сети / пер. с англ. О.Н. Андрейчиковой; науч. ред.: А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М.: УРСС: Ленанд, 2015. 357 с.
12. Тен А.В. Многокритериальная оптимизация как инструмент управления рисками в инвестиционной деятельности // Управление риском. 2009. № 4.
13. Метельков А., Чеботарев А., Цветкова Ю. Многокритериальная оптимизация планов по достижению целей организации // Проблемы теории и практики управления. 2008. № 3. С. 90–99.
14. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив. СПб.: Лань, 2009. 270 с.
15. Лотов А.В., Пospelova И.И. Лекции по теории и методам многокритериальной оптимизации. М.: ВМиК МГУ (Изд-во Москов. ун-та, филиал при факультете вычислит. математики и кибернетики), 2006. 130 с.
16. Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения. М.: Советское радио. 2007. 192 с.

17. Зайцев М.Г., Варюхин С.Е. Методы оптимизации управления и принятия решений: примеры, задачи, кейсы. М.: Дело АНХ, 2015. 640 с.
18. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000. 296 с.
19. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 2008. 398 с.
20. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация изучения и анализа экспертной информации. М.: Наука, 2004. 120 с.
21. Сидельников Ю.В. Теория и организация экспертного прогнозирования. М.: ИМЭМО, 1990. 195 с.

Information about the authors

Yakov D. Gelrud, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk; gelrudid@susu.ru.

Lyudmila I. Shestakova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk; shestakovali@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.

Vladimir L. Kodkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kodkinvl@susu.ru.

Vladimir I. Shiryaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shiriaevvi@susu.ru.

Информация об авторах

Гельруд Яков Давидович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск; gelrudid@susu.ru.

Шестакова Людмила Ивановна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск; shestakovali@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.

Кодкин Владимир Львович, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kodkinvl@susu.ru.

Ширяев Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shiriaevvi@susu.ru.

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

The authors declare no conflicts of interests.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 28.12.2023

Статья поступила в редакцию 28.12.2023

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 подразубрики. 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, № 3

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.07.2024. Дата выхода в свет 12.08.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Тираж 500 экз. Заказ 208/272. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.