

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2023
Т.23, № 2

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

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

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

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

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

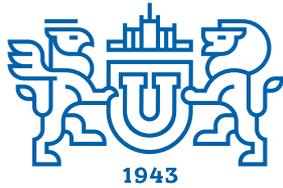
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

Редакционная коллегия:

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

Редакционный совет:

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



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2023

Vol. 23, no. 2

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

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

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

South Ural State University

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

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

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Council:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

АХМАД А., АНДРИЯНОВ Н.А., СОЛОВЬЕВ В.И., СОЛОМАТИН Д.А. Применение глубокого обучения для аугментации и генерации подводного набора данных с промышленными объектами	5
АНТОНОВ В.В., КУЛИКОВ Г.Г., ВОЯКОВСКАЯ Я.С., ПАЛЬЧЕВСКИЙ Е.В. Метод формирования структур цифровых двойников предметно-ориентированных объектов в пространстве открытых источников на основе формализмов теории множеств, графов, теории категорий и теории порождающих языков Хомского	17
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ШИНКАРЕВ А.А., КОВАЛЬ М.Е., ЯДРЫШНИКОВА М.В., СТАРОДУБЦЕВ Д.В. Разработка системы определения перемещения рабочих на производстве на основе OpenCV и алгоритма одностадийного детектора	28

Управление в социально-экономических системах

БАРКАЛОВ С.А., МОИСЕЕВ С.И., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Динамическая модель анализа рисков при реализации строительных проектов на основе марковских случайных процессов	40
БОЛОДУРИНА И.П., СПЕШИЛОВ Е.А. Применение правил нечеткой логики для анализа данных и принятия решений при управлении грузоперевозками в условиях неопределенности	52
ГОЛЛАЙ А.В., ГОЛЛАЙ И.Н., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Цифровая трансформация социально-экономических систем как конечный результат процесса цифровизации	65

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

КУСКАРБЕКОВА С.И., МАКСИМОВ Н.М., ОСИНЦЕВ К.В. Автоматизация группы питательных насосов в транспортабельной котельной установке	82
---	----

Краткие сообщения

АРТЮШИНА Л.А. Вероятностный подход к оценке защищенности информационной системы в задаче идентификации пользователя по клавиатурному почерку	93
КОСТЫЛЕВА Л.Ю., ВОЛОВИЧ Г.И., НЕКРАСОВ С.Г., РЕЦ Е.А. Определение поперечных размеров дефектов расслоения биметаллической пластины при активном тепловом неразрушающем контроле	102
ПАВЛОВИЧ Т.В., ДРОНЬ Е.А., КУЛИКОВ Г.Г. Разработка методики управления качеством данных на основе логико-семантического цифрового двойника	111

CONTENTS

Informatics and computer engineering

- AHMAD A., ANDRIYANOV N.A., SOLOVIEV V.I., SOLOMATIN D.A. Application of deep learning for augmentation and generation of an underwater data set with industrial facilities 5
- ANTONOV V.V., KULIKOV G.G., VOYAKOVSKAYA Ya.S., PALCHEVSKY E.V. A method of forming the structures of digital doubles of domain-oriented objects in the open source space based on the formalisms of the theory of sets, graphs, category theory and the theory of generating Chomsky languages 17
- LOGINOVSKIY O.V., SHINKAREV A.A., KOVAL M.E., YADRYSHNIKOVA M.V., STARODUBTCEV D.V. Development of system for detecting movements of workers in workplace based on OpenCV and one-stage detector algorithm 28

Control in social and economic systems

- BARKALOV S.A., MOISEEV S.I., SEREBRYAKOVA E.A. Risk analysis dynamic model in the implementation of construction projects based on Markov random processes 40
- BOLODURINA I.P., SPESHILOV E.A. Application of fuzzy logic rules for data analysis and decision-making in cargo transportation management under conditions of uncertainty 52
- HOLLAY A.V., GOLLAY I.N., LOGINOVSKIY O.V. Digital transformation of socio-economic systems as the end result of the digitalization process 65

Automated process control systems

- KUSKARBEKOVA S.I., MAKSIMOV N.M., OSINTSEV K.V. Automation of a group of feed pumps in a transportable boiler plant 82

Brief reports

- ARTYUSHINA L.A. A probabilistic approach to assessing the security of the information system in the problem of user identification by keypad handwriting 93
- KOSTYLEVA L.Yu., VOLOVICH G.I., NEKRASOV S.G., RETC E.A. Determining the dimensions of delaminating defects in a bimetallic plate using active thermal non-destructive testing 102
- PAVLOVICH T.V., DRON E.A., KULIKOV G.G. Development of a data quality management methodology based on logical-semantic digital double 111

Информатика и вычислительная техника

Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.896

DOI: 10.14529/ctcr230201

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АУГМЕНТАЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ ПОДВОДНОГО НАБОРА ДАННЫХ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А. Ахмад^{1, 2, 3}, aws.ahmad318@gmail.com

Н.А. Андриянов³, naandriyanov@fa.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-7697>

В.И. Соловьев^{2, 4}, vs@ciars.ai, <https://orcid.org/0000-0003-0338-1227>

Д.А. Соломатин³, deniso2001@gmail.com

¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

² *ООО «ЦИАРС», Москва, Россия*

³ *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия*

⁴ *Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Аннотация. Цель исследования: разработка метода глубокого обучения для аугментации и генерации проблемно-ориентированного набора данных, содержащего промышленные объекты, в том числе разработка более эффективных алгоритмов генерации и аугментации данных, основанных на глубоком обучении, которые позволяют создавать более разнообразные и реалистичные данные, соответствующие промышленным объектам, которые могут быть перенесены из одного стилевого домена в другой. Поставленная в исследовании цель связана с наличием актуальной научно-технической задачи обеспечения компьютерного зрения в системах, работающих в подводной среде. Это могут быть автономные необитаемые подводные аппараты, которые ищут прорывы в трубопроводах, анализируют утечку нефти, движение косяков рыб и т. п. Однако достаточного количества данных, содержащих описанные объекты в условиях их реального существования, сегодня нет. Таким образом, необходимо обеспечить обучающую выборку реалистичными изображениями. **Методы исследования:** архитектура CycleGAN, обеспечивающая преобразование набора данных, содержащего изображения различных объектов, сделанные в лабораторной или в обычной наземной среде, в набор данных, содержащий характеристики подводной среды. Для оценки разработанного алгоритма аугментации предлагается использовать классификацию изображений по доменам, которая может быть выполнена с помощью сверточной нейронной сети ResNet. **Результаты исследования.** Представлен инструмент для решения проблемы отсутствия подводных наборов данных, разработана модель глубокого обучения, которая применяется для создания изображений с подводными элементами. Модель работает по принципу циклической генеративно-сопоставительной сети, которая получает на вход реальное изображение промышленного объекта в надводных условиях, а на выход возвращает сгенерированное изображение того же промышленного объекта в подводных условиях. Визуальный анализ изображений показывает, что такой метод достаточно адекватен. Кроме того, проверка на классификационной модели показала почти 100%-ную способность нейросети различать домены. **Заключение.** Исследование показало, что модель CycleGAN можно использовать для создания изображений различных объектов в подводной среде. В будущем возможен поиск дополнительных процедур аугментации, кроме того, могут быть использованы аугментации сгенерированного набора изображений, что также обеспечит исследователей и разработчиков достаточным материалом с промышленными объектами в подводной среде. Это может повысить качество разработок.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), машинное обучение, глубокое обучение, CNN (сверточные нейронные сети), сопоставительные потери (adversarial losses), CycleGAN, дискриминатор

Для цитирования: Применение глубокого обучения для аугментации и генерации подводного набора данных с промышленными объектами / А. Ахмад, Н.А. Андриянов, В.И. Соловьев, Д.А. Соломатин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 5–16. DOI: 10.14529/ctcr230201

APPLICATION OF DEEP LEARNING FOR AUGMENTATION AND GENERATION OF AN UNDERWATER DATA SET WITH INDUSTRIAL FACILITIES

A. Ahmad^{1, 2, 3}, aws.ahmad318@gmail.com

N.A. Andriyanov³, naandriyanov@fa.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-7697>

V.I. Soloviev^{2, 4}, vs@ciars.ai, <https://orcid.org/0000-0003-0338-1227>

D.A. Solomatin³, deniso2001@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² CIARS LLC, Moscow, Russia

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁴ Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study: development of a deep learning method for augmentation and generation of a problem-oriented dataset containing industrial objects, including the development of more efficient data generation and augmentation algorithms based on deep learning, which allow you to create more diverse and realistic data corresponding to industrial objects that can be transferred from one style domain to another. The goal set in the study is related to the actual scientific and technical problem of providing computer vision in systems operating in the underwater environment. These can be autonomous uninhabited underwater vehicles that look for breaks in pipelines, analyze oil leaks, the movement of schools of fish, etc. However, today there is not enough data containing the described objects in the conditions of their real existence. Thus, it is necessary to provide the training sample with realistic images.

Research methods: the CycleGAN architecture, which converts a dataset containing images of various objects taken in a laboratory or in a conventional aboveground environment into a dataset containing the characteristics of an underwater environment. To evaluate the developed augmentation algorithm, it is proposed to use image classification by domains, which can be performed using the ResNet convolutional neural network. **Results of the study.** A tool is presented to solve the problem of the lack of underwater datasets, a deep learning model is developed, which is used to create images with underwater elements. The model works on the principle of a cyclic generative adversarial network, which receives a real image of an industrial facility in surface conditions as an input, and returns a generated image of the same industrial facility in underwater conditions as an output. Visual analysis of images shows that this method is quite adequate. In addition, a test on the classification model showed almost 100% ability of the neural network to distinguish between domains. **Conclusion.** The study showed that the CycleGAN model can be used to create images of various objects in the underwater environment. In the future, it is possible to search for additional augmentation procedures, in addition, augmentations of the generated set can be used images, which will also provide researchers and developers with sufficient material with industrial facilities in the underwater environment. This can improve the quality of developments.

Keywords: autonomous underwater vehicles (AUV), machine learning, deep learning, CNN (Convolutional neural networks), adversarial losses, CycleGAN, discriminator

For citation: Ahmad A., Andriyanov N.A., Soloviev V.I., Solomatin D.A. Application of deep learning for augmentation and generation of an underwater data set with industrial facilities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):5–16. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230201

Введение

В настоящее время растет потребность и интерес к использованию и разработке автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для изучения и защиты подводной среды, проведения поисково-спасательных работ, разведывательных операций и операций по обнаружению объектов в морской среде. Особенно такая потребность важна в тех средах, в которых содержатся промышленные объекты: нефте- и газопроводы, ветряные турбины, интернет-кабели и т. д.

Из-за сложности доступа к этим участкам, дороговизны и опасности для человека при проведении этих операций научное сообщество приступило к разработке автономных подводных аппаратов, способных выполнять такие задачи автономно, без участия человека [1–3].

Обнаружение объектов является важной частью рабочего процесса обработки изображений. Хотя существует множество подходов, основанных на компьютерном зрении [4–6], их производительность остается достаточно низкой из-за особенностей подводной среды. Во многом это связано с препятствиями, которые рассеивают и поглощают свет в подводных условиях.

После научной революции в области глубокого обучения большое внимание стало уделяться внедрению этих технологий в подводные операции [7–9], чтобы робот мог выполнять эти задачи автоматически. Технологии глубокого обучения позволили значительно продвинуться в цифровой обработке изображений для распознавания и категоризации объектов. Использование глубокого обучения позволило решить широкий круг вопросов, включая защиту морской экосистемы, спасение жизней в чрезвычайных ситуациях, предотвращение подводных бедствий, а также обнаружение, отслеживание и идентификацию подводных целей.

Но задачи, связанные с обнаружением подводных объектов, сталкиваются с трудностями из-за нехватки обучающих наборов данных. Исследователи решают эту проблему, используя новые технологии, ставшие доступными благодаря быстрому развитию искусственного интеллекта в последние годы.

Задача обнаружения объектов в подводной среде

Подводные автономные роботы должны понимать сложную окружающую среду в большинстве миссий, чтобы проводить полностью автономные операции. При этом обнаружение объектов является одной из основных задач разведки и поисково-спасательных операций. Сложная подводная среда создает трудности для обнаружения объектов: несбалансированные условия освещения, низкая контрастность, перекрытие объектами друг друга. Изображения, получаемые с подводной камеры, как правило, являются расплывчатыми, и обычные детекторы компьютерного зрения часто не справляются с обнаружением объектов на таких изображениях. Появившиеся в последние несколько лет модели машинного обучения, став более сложными и точными, позволяют обнаруживать и сегментировать объекты в том числе и в таких сложных условиях. Некоторые знаковые нейросетевые архитектуры, которые произвели эту революцию, включают семейство моделей R-CNN [10], YOLO [11], FPN [12] и др.

Наборы данных в подводной среде

Машинное обучение (Machine Learning, ML) – это набор методов анализа данных, который позволяет обучать аналитические системы решать повторяющиеся типовые аналитические задачи без использования программирования, на основе выявления закономерностей или скрытых паттернов в данных и принятия решений с минимальным участием человека.

Для обучения требуется размеченный набор данных – обучающие данные, которые содержат примеры решения проблем. Алгоритмы машинного обучения выявляют в них закономерности и в итоге могут прогнозировать результат на неразмеченных данных с контролируемым качеством прогноза, поэтому их можно использовать на практике.

При применении подходов глубокого обучения в нашей задаче, связанной с классификацией или обнаружением водозлазов и посторонних объектов в подводной среде, одним из наиболее частых препятствий является нехватка обучающих наборов данных.

На сегодняшний день доступно лишь небольшое количество наборов изображений подводной среды для обучения моделей компьютерного зрения [13]. Известные наборы изображений перечислены в таблице.

Проблемы нехватки данных и малое количество наборов изображений с подводной средой обусловлены следующими причинами:

- сбору подводных изображений не уделялось достаточного внимания;
- возникали трудности, связанные с подводной средой, поскольку сбор подводных данных – трудоемкая работа, требующая привлечения специалистов и использования специального оборудования.

Для решения проблемы нехватки данных обычно применяют методы аугментации данных (data augmentation) [24, 25]. Классические методы аугментации включают внесение изменений в набор данных путем применения таких операций, как вращение и масштабирование. Эти методы часто используются для увеличения размера набора данных и его разнообразия. Неклас-

сические методы аугментации включают внесение изменений в набор данных путем применения более продвинутых методов, таких как добавление шума, обрезка и изменение цвета изображений [26].

Наборы изображений подводной среды
Underwater environment image sets

MUED [14]	Marine Underwater Environment Database – набор 8600 подводных изображений объектов 430 классов со сложным фоном и различными вариациями пространственного положения, освещения, мутности воды и т. д.
RUIE [15]	Real-time Underwater Image – набор данных, состоящий из трех поднаборов: Underwater Image Quality Set (UIQS), Underwater Color Cast Set (UCCS), Underwater Task-driven Testset (UTTS)
SUIM [16]	Segmentation of Underwater Imagery – набор данных, содержащий более 1500 изображений объектов 8 категорий: рыб, рифов, водных растений, затонувших кораблей, дайверы, роботы и морское дно
TrashCan [17]	Набор данных для сегментации экземпляров подводного мусора, содержащий 7212 изображений подводных роверов, подводного мусора, а также подводной флоры и фауны
UIEB [18]	Underwater Image Enhancement Benchmark Dataset – 950 реальных подводных изображений, 890 из которых имеют соответствующие эталонные изображения
Underwater_ImageNet [18, 19]	Набор подводных объектов, вручную отобранных из набора ImageNet, а также из подводных видео с Youtube
Test-lhnog [20]	Набор изображений экипировки аквалангистов
Human [21]	Набор изображений аквалангистов
Please [22]	Набор изображений потерпевших крушение кораблей
P [23]	Набор изображений производственных труб

Для таких задач, как перенос стиля, т. е. фоновой составляющей желаемой среды, классические методы аугментации данных не могут генерировать изображения, близкие к реальным. К тому же, как было отмечено, наборов изображений промышленных объектов (например, нефте- и газопроводов) существует крайне мало, и их тяжело собрать.

Для решения нам потребуются такие модели глубокого обучения, как генеративно-состязательные сети (Generative Adversarial Networks GAN) [27], CycleGAN [28] и U-Net [29], которые являются современными методами, используемыми для расширения наборов данных и увеличения их размера [30, 31]. Генеративно-состязательные сети в основном используются для создания синтетических изображений, которые следуют тому же распределению вероятностей, что и реальные изображения. CycleGAN – это хорошо известная архитектура генеративно-состязательных сетей, которая обычно используется для изучения преобразований изображений по различным шаблонам.

CycleGAN

Cycle Generative Adversarial Network (CycleGAN) – это подход к обучению глубоких сверточных сетей (Convolutional Neural Networks CNN) [10] для задач преобразования одного изображения в другое. В отличие от других моделей GAN для задач перевода изображений, CycleGAN изучает отображения (mappings) между одним доменом изображения и другим, используя обучение без учителя (unsupervised learning).

Нас интересует преобразование изображения целевых объектов, которые находятся в лабораторном домене (Lab), в изображение в домене подводной среды (Unw). Способ, которым CycleGAN [28] осуществляет такое преобразование, заключается в обучении сетей генераторов отображению из домена Lab в изображение, которое выглядит так, как будто оно получено из домена Unw (и наоборот), как показано на рис. 1.

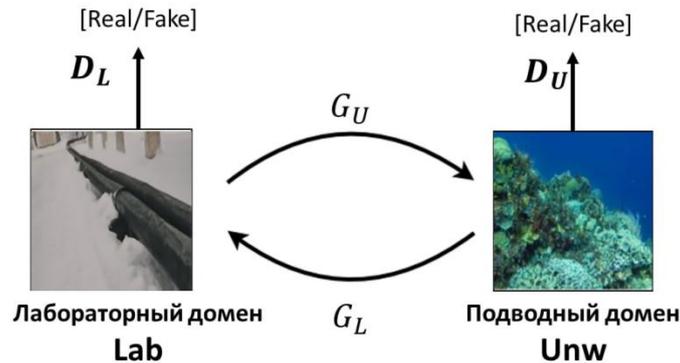


Рис. 1. Схема работы CycleGAN
Fig. 1. CycleGAN scheme

Отобразим задачи генераторов как перевод среди множеств подводной и лабораторной среды:

$$\begin{aligned} G_L &: Unw \rightarrow Lab; \\ G_U &: Lab \rightarrow Unw. \end{aligned} \quad (1)$$

G_L и G_U – это генераторы, которые берут изображение из одного домена и переводят его в другой. G_L отображает картинку из Unw в Lab ($x \rightarrow y$), тогда как G_U идет в противоположном направлении, отображая из Lab в Unw ($y \rightarrow x$).

У каждого генератора есть соответствующий дискриминатор, который пытается отличить синтезированные изображения от реальных:

$$\begin{aligned} D_L &: \text{отличает } x \text{ от } G_L(y); \\ D_U &: \text{отличает } y \text{ от } G_U(x). \end{aligned} \quad (2)$$

D_L дискриминатор обеспечивает состязательное обучение (adversarial learning) для G_L , а D_U делает то же самое для G_U .

Оба генератора G_L и G_U обучаются «обману» соответствующего дискриминатора, чтобы он был менее способен отличать сгенерированные изображения от реальных версий в каждом домене.

Модели дискриминатора и генератора обучаются в состязательном процессе, как и обычные модели GAN [27]. Данный процесс обучения предполагает оптимизацию двух типов потерь:

1) Adversarial Losses – состязательные потери для сопоставления распределения сгенерированных изображений с распределением данных в целевом домене:

$$\begin{aligned} Loss_{adv}(G_U, D_U, Lab) &= \frac{1}{m} \sum_1^m [1 - D_U(G_U(x_i))]^2; \\ Loss_{adv}(G_L, D_L, Unw) &= \frac{1}{m} \sum_1^m [1 - D_L(G_L(y_i))]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_i \in Lab$, $y_i \in Unw$;

2) Cycle Consistency Losses – потери согласованности цикла для предотвращения противоречия изученных отображений G_L и G_U друг другу:

$$Loss_{cy}(G_L, G_U, Lab, Unw) = \frac{1}{m} \sum_1^m [G_L(G_U(x_i) - x_i)] + [G_U(G_L(y_i) - y_i)]. \quad (4)$$

Потери согласованности цикла иллюстрирует рис. 2.

Теперь можно записать полную целевую функцию, объединив эти условия потерь в свертку и присвоив потере согласованности цикла вес λ :

$$Loss_{Full} = Loss_{adv} + \lambda Loss_{cy}. \quad (5)$$

Значение гиперпараметра λ подбирается как решение задачи минимизации функции потерь (5).

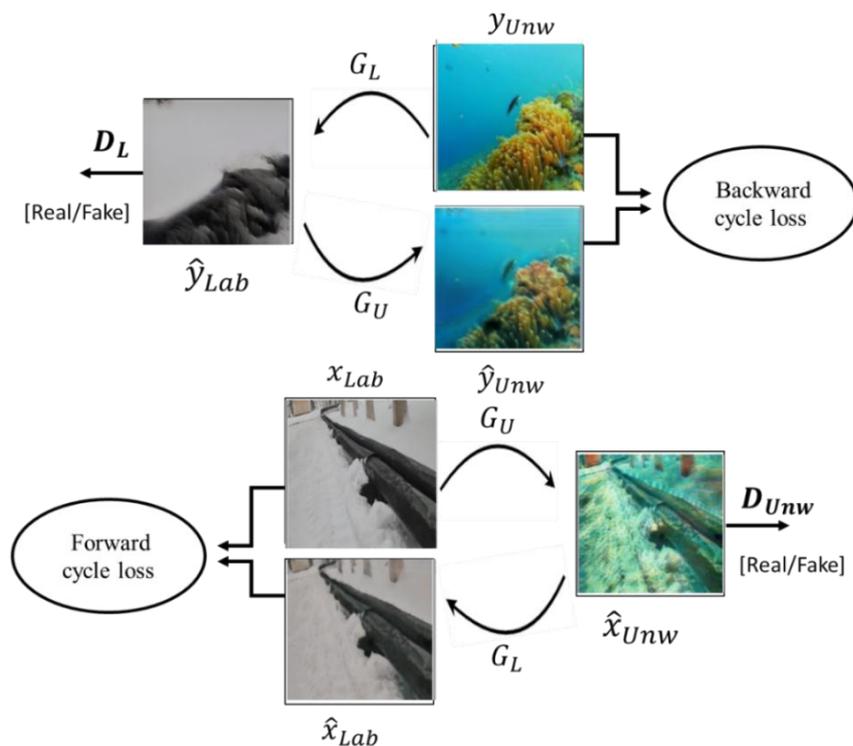


Рис. 2. Потери согласованности цикла
Fig. 2. Cycle consistency losses

Наборы данных CycleGAN

Из-за перечисленных особенностей подводной среды сложно получить набор данных, содержащий изображения деталей механического и промышленного оборудования, которые потенциально могут быть обнаружены в подводных структурах.

Для генерации набора данных с целевыми объектами в подводной среде в данной работе используется подход перевода изображений в изображения CycleGAN (CycleGAN Image-to-Image Translation) [28, 31].



Рис. 3. Набор изображений подводной среды
(underwater_ImageNet) [19]
Fig. 3. Underwater environment image set
(underwater_ImageNet) [19]



Рис. 4. Базовый набор изображений [32]
Fig. 4. The basic image set [32]

Вначале из общедоступных наборов данных был отобран набор изображений подводной среды, представляющих ее наиболее точно (набор данных Underwater_ImageNet) [19] (рис. 3). Затем был собран базовый набор данных – набор изображений объектов механического и промышленного оборудования, которые потенциально могут быть обнаружены в подводной среде [32] (рис. 4). Данный этап выполнен в лабораторных условиях.

На следующем этапе набор изображений подводной среды и базовый набор изображений были использованы для обучения модели CycleGAN.

Архитектура модели CycleGAN

Архитектура модели CycleGAN представлена на рис 5. В этой модели характеристики изображения подводного домена y_{Unw} преобразуются в лабораторный домен \hat{y}_{Lab} с помощью генератора G_L .

Затем генератор G_U преобразует изображения лабораторного домена x_{Lab} в подводный домен, что в итоге приводит к созданию искусственных изображений \hat{x}_{Unw} .

Дискриминаторы D_L, D_{Unw} отвечают за мониторинг и сравнение искусственных изображений $\hat{y}_{Lab}, \hat{x}_{Unw}$ в каждом домене с подлинными на самой последней фазе сети, при этом вычисляются состязательные подери $Loss_{adv}$ (3), по которым оптимизируется окончательный вывод изображений дискриминаторами.

Затем на каждом этапе процесса модель реконструирует искусственные изображения $\hat{y}_{Lab}, \hat{x}_{Unw}$ в исходный домен $\hat{x}_{Lab}, \hat{y}_{Unw}$ и рассчитывает потери согласованности цикла $Loss_{cy}$ (4).

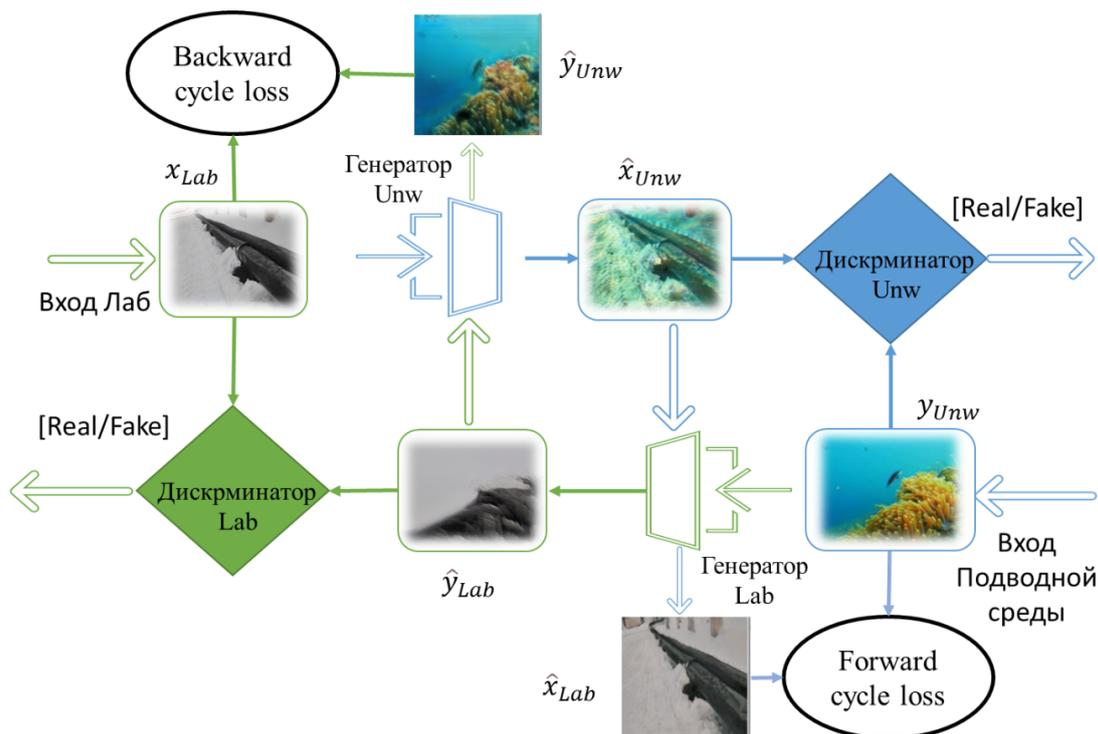


Рис. 5. Общая схема CycleGAN
Fig. 5. The general scheme of CycleGAN

Результаты

Основная цель глубокого обучения для аугментации данных состоит в генерации изображений механического и промышленного оборудования в подводной среде.

На рис. 6 показаны некоторые результаты, полученные с помощью модели CycleGAN. Видно, что модель генерирует новые изображения так, как будто они действительно были сделаны в подводной среде.



Рис. 6. Примеры сгенерированных изображений
Fig. 6. Generated images examples

Для проверки качества результатов генерации подводных изображений был использован классификатор сгенерированных изображений – предобученная модель ResNet-50 [33]. ResNet-50 (Residual Network – остаточная сеть) представляет собой 50-слойную сверточную нейронную сеть (48 сверточных слоев, один слой MaxPool и один средний слой пула), в которой проблема исчезающих градиентов решается с использованием концепции быстрых подключений, которые «пропускают» некоторые уровни, преобразуя обычную сеть в остаточную (Residual).

На рис. 7 представлена архитектура ResNet-50, где был отредактирован последний полносвязный слой FC и установлен выход на 2 класса. Был обучен только последний линейный слой FC с использованием 3000 изображений подводной среды (из набора Underwater_ImageNet) и 500 изображений из базового набора.

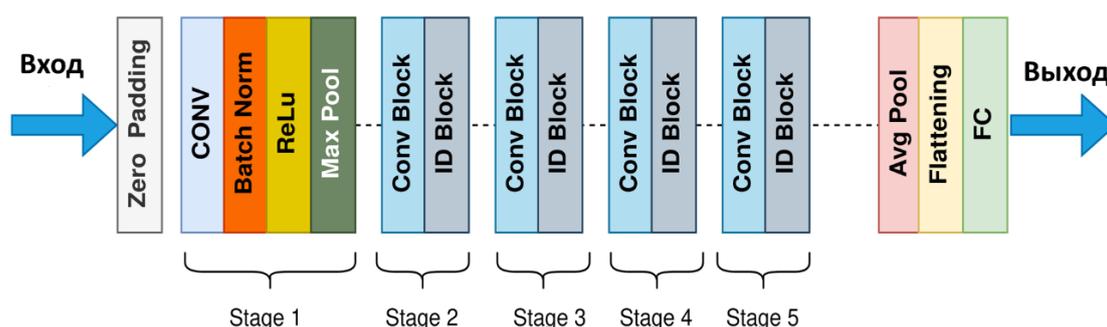


Рис. 7. Архитектура ResNet-50
Fig. 7. ResNet-50 architecture

Примеры результатов классификации сгенерированных изображений представлены на рис. 8. При этом все изображения, созданные с помощью CycleGAN, как избытки классифицированы как изображения в подводном домене.

Матрица ошибок классификации, представленная на рис. 9, позволяет оценить точность классификации $Precision = TP / (TP + FP) = 0,99865$, полноту $Recall = TP / (TP + FN) = 1,00000$ и метрику $F_1 = 2Precision \cdot Recall / (Precision + Recall) = 0,99933$.

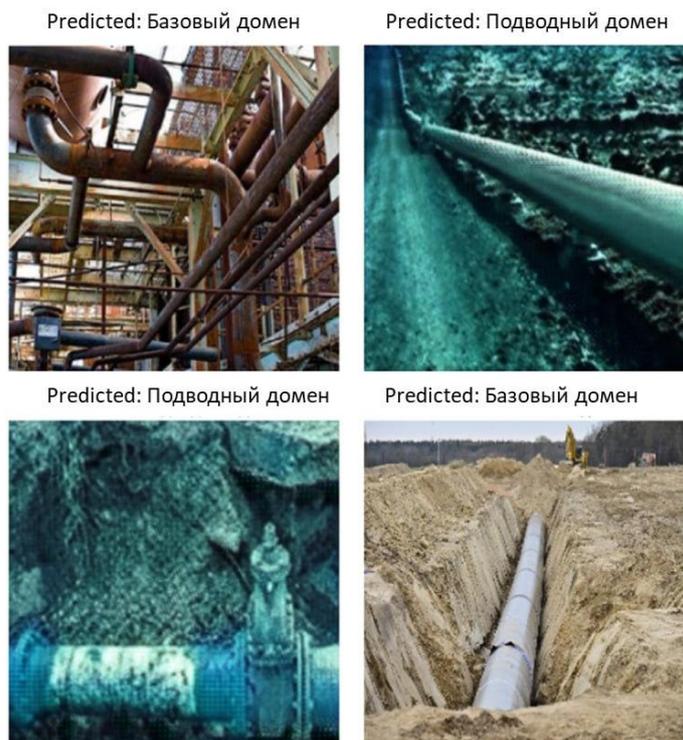


Рис. 8. Примеры классификации изображений
Fig. 8. Image classification examples



Рис. 9. Матрица ошибок классификации
Fig. 9. Classification confusion matrix

Заключение

В данной работе представлен инструмент для решения проблемы отсутствия наборов изображений промышленного оборудования в подводной среде, актуальной в связи с ростом потребности в ремонтных, исследовательских, спасательных и других подводных работах в подводной среде и отсутствием инструмента для создания искусственных подводных изображений.

Была разработана модель глубокого обучения, которая применяется для создания изображений с подводными элементами. В модели используются сделанные в надводной среде изображения объектов, которые потенциально можно обнаружить под водой (труб, клапанов, фланцев, винтов и т. п.), и изображения подводной среды, взятые из общедоступных наборов данных.

Исследование показало, что сверточная нейронная сеть CycleGAN способна эффективно генерировать изображения объектов в подводной среде ($F_1 = 0,99933$ на тестовой выборке из $N = 805$ изображений).

Сгенерированный новый набор изображений можно использовать для решения задач сегментации изображений и обнаружения объектов с помощью трансферного обучения [34–38].

Список литературы/References

1. Ridolfi A., Conti R., Costanzi R. A dynamic manipulation strategy for an intervention: Autonomous underwater vehicle. *Advances in Robotics and Automation*. 2015;4(2):100–132. DOI: 10.4172/2168-9695.1000132
2. Wynn R.B., Huvenne V.A.I., Le Bas T.P. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geosciences. *Marine Geology*. 2014;352:451–468. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.03.012
3. Alam K., Ray T., Anavatti S.G. A brief taxonomy of autonomous underwater vehicle design literature. *Ocean Engineering*. 2014;88:627–630. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.04.027
4. Manzanilla A., Reyes S., Garcia M. Autonomous navigation for unmanned underwater vehicles: Real-time experiments using computer vision. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(2):1351–1356. DOI: 10.1109/LRA.2019.2895272
5. Reggiannini M., Moroni D. The use of saliency in underwater computer vision: A review. *Remote Sensing*. 2021;13(1):1–16. DOI: 10.3390/rs13010022
6. Andriyanov N.A., Dementiev V.E., Tashlinskii A.G. Detection of objects in the images: From likelihood relationships towards scalable and efficient neural networks. *Computer Optics*. 2022;46(1):139–159. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-922
7. Jin L., Liang H. Deep learning for underwater image recognition in small sample size situations. In: *OCEANS 2017 – Aberdeen*. Aberdeen, UK; 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084645
8. Meng L., Hirayama T., Oyanagi S. Underwater-drone with panoramic camera for automatic fish recognition based on deep learning. *IEEE Access*. 2018;6:17880–17886. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2820326
9. Yang H., Liu P., Hu Y., Fu J. Research on underwater object recognition based on YOLOv3. *Microsystem Technologies*. 2021;27(9):1837–1844. DOI: 10.1007/s00542-019-04694-8
10. Girshick R. Fast R-CNN. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Araucano Park; 2015. Vol. 1. P. 1440–1448.
11. Bochkovskiy A., Wang C.Y., Liao H.Y.M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (accessed 03.04.2023).
12. Cazzato D. A survey of computer vision methods for 2d object detection from unmanned aerial vehicles. *Journal of Imaging*. 2020;6:1–8. DOI: 10.3390/jimaging6080078
13. Dakhil R.A., Khayeat A.R.H. Review on deep learning technique for underwater object detection. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Data Science and Machine Learning (DSML)*. Copenhagen; 2022. Vol. 1. P. 49–63.
14. Jian M., Qi Q., Yu H. The extended marine underwater environment database and baseline evaluations. *Applied Soft Computing*. 2019;80:425–437. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.04.025
15. Liu R., Hou M., Fan X. Real-world underwater enhancement: Challenges, benchmarks, and solutions under natural light. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2020;30(12):4861–4875. DOI: 10.1109/TCSVT.2019.2963772
16. Islam M.J., Edge C., Xiao Y. Semantic segmentation of underwater imagery: Dataset and benchmark. In: *Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Las Vegas; 2020. Vol. 1. P. 1–6. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340821
17. Hong J., Fulton M., Sattar J. TrashCan: A semantically-segmented dataset towards visual detection of marine debris. Available at: <https://arxiv.org/abs/2007.08097> (accessed 01.04.2023).
18. Fabbri C., Islam M.J., Sattar J. Enhancing underwater imagery using generative adversarial networks. In: *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Brisbane; 2018. Vol. 1. P. 7159–7165.

19. Underwater_ImageNet Dataset. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1LOM-2A1BSLaFjCY2EEK3DA2Lo37rNw-7/view> (accessed 07.03.23).
20. Test-lhnog Dataset. Available at: <https://universe.roboflow.com/new-workspace-qnaXk/test-lhnog> (accessed 07.03.23).
21. Human Dataset. Available at: <https://universe.roboflow.com/school-9j0uz/human-ighgb> (accessed 07.03.23).
22. Please Dataset. Available at: <https://universe.roboflow.com/new-workspace-bpkjt/please> (accessed 07.03.23).
23. Pipes Dataset. Available at: <https://universe.roboflow.com/pipes-nty6m/p-w1typ> (accessed 07.03.23).
24. Perez L., Wang J. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. Available at: <https://arxiv.org/abs/1712.04621> (accessed 24.03.2023).
25. Andriyanov N.A., Andriyanov D.A. The using of data augmentation in machine learning in image processing tasks in the face of datascarcity. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1661(1):012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012018
26. Buslaev A., Igloukov V.I., Khvedchenya E., Parinov A., Druzhinin M., Kalinin A.A. Albumentations: Fast and flexible image augmentations. *Information*. 2020;11(2):1–20. DOI: 10.3390/info11020125
27. Goodfellow I.J., Pouget-Abadie J., Mirza M. Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*. 2020;63(1):139–144. DOI: 10.1145/3422622
28. Zhu J.Y., Park T., Isola P., Efros A.A. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Venice; 2017. Vol. 1. P. 2223–2232.
29. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Available at: <https://arxiv.org/abs/1505.04597> (accessed 02.04.2023).
30. Polymenis I., Haroutunian M., Norman R., Trodden D. Virtual underwater datasets for autonomous inspections. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;9:1–18. DOI: 10.3390/jmse10091289
31. Welander P., Karlsson S., Eklund A. Generative adversarial networks for image-to-image translation on multi-contrast MR images – A comparison of CycleGAN and UNIT. Available at: <https://arxiv.org/abs/1806.07777> (accessed 03.04.2023).
32. Набор изображений механического и промышленного оборудования [*Nabor izobrazheniy mekhanicheskogo i promyshlennogo oborudovaniya* [Dataset of images of mechanical and industrial equipment]]. Available at: https://drive.google.com/drive/folders/1p4mSIse4PEPx9pDR7TMDgL6nPVnLpzFi?usp=share_link (accessed 25.03.23)].
33. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas; 2016. Vol. 1. P. 770–778.
34. Andriyanov N.A., Dementiev V.E., Tashlinskiy A.G. Deep Markov models of multidimensional random fields. *Procedia Computer Science*. 2020;176:1289–1298. DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.138
35. Andriyanov N., Khasanshin I., Utkin D., Gataullin T., Ignar S., Shumaev V., Soloviev V. Intelligent system for estimation of the spatial position of apples based on YOLOv3 and Real Sense depth camera D415. *Symmetry*. 2022;14(1):148. DOI: 10.3390/sym14010148
36. Kuznetsova A.A., Maleva T.V., Soloviev V.I. Using the YOLOv3 algorithm with pre- and post-processing procedures for fruit detection by an apple-picking robot. *Journal of Applied Informatics*. 2020;15(4):64–74. (In Russ.) DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-4-64-74
37. Kalashnikov V., Soloviev V. Applications of computer vision in the mining industry. *Journal of Applied Informatics*. 2023;8(1):4–21. (In Russ.) DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-1-4-21
38. Andriyanov N.A., Volkov A.I., Volkov A.N., Gladkikh A.A. Research of recognition accuracy of dangerous and safe x-ray baggage images using neural network transfer learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1061:012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1061/1/012002

Информация об авторах

Ахмад Авс, аспирант кафедры робототехнических систем и мехатроники, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия; руководитель группы мехатроники и робототехники, ООО «ЦИАРС», Москва, Россия; ассистент Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; aws.ahmad318@gmail.com.

Андрянов Никита Андреевич, канд. техн. наук, доц. Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; naandriyanov@fa.ru.

Соловьев Владимир Игоревич, д-р экон. наук, проф., генеральный директор, ООО «ЦИАРС», Москва, Россия; заведующий кафедрой прикладного искусственного интеллекта, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия; vs@ciars.ai.

Соломатин Денис Алексеевич, бакалавр Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; deniso2001@gmail.com.

Information about the authors

Aws Ahmad, Postgraduate Student of the Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; Head of Mechatronics and Robotics Group, CIARS LLC, Moscow, Russia; Assistant of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; aws.ahmad318@gmail.com.

Nikita A. Andriyanov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; naandriyanov@fa.ru.

Vladimir I. Soloviev, Dr. Sci. (Econ.), Prof., CEO, CIARS LLC, Moscow, Russia; Head of the Department of Applied Artificial Intelligence, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia; vs@ciars.ai.

Denis A. Solomatina, Bachelor of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; deniso2001@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.03.2023

The article was submitted 11.03.2023

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛИЗМОВ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ, ГРАФОВ, ТЕОРИИ КАТЕГОРИЙ И ТЕОРИИ ПОРОЖДАЮЩИХ ЯЗЫКОВ ХОМСКОГО

В.В. Антонов¹, antonov.v@bashkortostan.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-9525>

Г.Г. Куликов¹, gennadyg_98@yahoo.com

Я.С. Вояковская¹, in.edem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8241-3842>

Е.В. Пальчевский², teelxp@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9033-5741>

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

Аннотация. Для материала данной статьи открытые источники могут быть представлены как информация, размещенная в сети Интернет для многократного и неограниченного использования в виде машиночитаемых систематизированных данных, в форматах, позволяющих их отдельную автоматизированную обработку. Любой из открытых источников – это частично структурированный контент, характеризующийся тем, что состоит из нечетких перекрытий и связей, формализованных рядом устойчивых правил. **Цель исследования** состоит в том, чтобы произвести математическое описание правил декомпозиции связей виртуальных образов контента на основании статистических данных сопоставлений с целью формулирования цифрового аналога вербальной структуры. Исследованию сопутствует разработка модульной кроссплатформенной системы предиктивной аналитики распределенных открытых источников социальной цифровой среды на основе технологий многопоточной обработки данных. В основу системы ложится создание прототипа цифрового двойника, позволяющего производить мониторинг и последующий анализ открытых источников. Кроссплатформенный цифровой двойник может быть создан для различных открытых источников. В настоящее время среди них приоритетными для анализа исследуемых данных являются социальные сети. **Материалы и методы.** При однотипном контенте кода становится необходимым формализовать правила категоризации семантических значений структуры связей объекта исследования, которые могут быть описаны на языке теории графов, иметь подходящую им структуру в матрицах Ли, подчиняться законам транзитивности и обладать свойствами, позволяющими воссоздать связность в квазипроекции. Предлагается метод, позволяющий производить последовательные исчисления, не противоречащие друг другу по основным правилам аксиоматики. **Результаты.** Метод позволяет производить анализ в режиме реального времени потока данных открытых источников, идентифицировать цифровые следы объектов исследования, выявление структуры их связей. **Заключение.** С помощью предлагаемой группы алгоритмизированных математических итераций становится возможным создание совокупности локальных систем с подсистемами обратной связи предиктивной аналитики открытых источников интернет-ресурсов и локальных систем различного назначения

Ключевые слова: цифровой двойник, открытые источники, семантический дифференциал, семантическое пространство, β -уровневые отношения, алгоритм Прима, алгоритм Флойда – Уоршала, алгоритм Белмана – Форда, алгоритм Форда – Фалкерсона, матрицы Кирхгофа, модель связности, порождающие грамматики Хомского, квазипроекция, алгебры Ли, группы Ли, закон Ципфа

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FEUE-2023-0007.

Для цитирования: Метод формирования структур цифровых двойников предметно-ориентированных объектов в пространстве открытых источников на основе формализмов теории множеств, графов, теории категорий и теории порождающих языков Хомского / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, Я.С. Вояковская, Е.В. Пальчевский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 17–27. DOI: 10.14529/ctcr230202

A METHOD OF FORMING THE STRUCTURES OF DIGITAL DOUBLES OF DOMAIN-ORIENTED OBJECTS IN THE OPEN SOURCE SPACE BASED ON THE FORMALISMS OF THE THEORY OF SETS, GRAPHS, CATEGORY THEORY AND THE THEORY OF GENERATING CHOMSKY LANGUAGES

V.V. Antonov¹, antonov.v@bashkortostan.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-9525>
G.G. Kulikov¹, gennadyg_98@yahoo.com
Ya.S. Voyakovskaya¹, in.edem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8241-3842>
E.V. Palchevsky², teelxp@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9033-5741>

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

² Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. For the material of this article, open sources can be presented as information posted on the Internet for multiple and unlimited use in the form of machine-readable systematized data, in formats that allow their separate automated processing. Any of the open sources is partially structured content, characterized by the fact that it consists of fuzzy overlaps and connections formalized by a number of sustainable rules. **Aim.** The purpose of the study is to produce a mathematical description of the rules for the decomposition of links of virtual images of content based on statistical data of comparisons in order to formulate a digital analogue of the verbal structure. The research is accompanied by the development of a modular cross-platform predictive analytics system for distributed open sources of the social digital environment based on multi-stream data processing technologies. The system is based on the creation of a prototype of a digital twin, which allows monitoring and subsequent analysis of open sources. A cross-platform digital twin can be created for various open sources. Currently, among them, social networks are a priority for the analysis of the studied data. **Materials and methods.** Turning to the same type of code content, it becomes necessary to formalize the rules for categorizing the semantic meanings of the structure of connections of the object of study, which can be described in the language of graph theory, have a suitable structure in Lie matrices, obey the laws of transitivity and have properties that allow you to recreate connectivity in a quasi-projection. A method is proposed that makes it possible to produce sequential calculus that does not contradict each other according to the basic rules of axiomatics. **Results.** The method allows for real-time analysis of the data flow of open sources, identification of digital traces of research objects, identification of the structure of their connections. **Conclusion.** With the help of the proposed group of algorithmized mathematical iterations, it becomes possible to create a combination of local systems with feedback subsystems of predictive analytics of open sources of Internet resources and local systems for various purposes.

Keywords: digital twin, open sources, semantic differential, semantic space, β -level relations, Prim's algorithm, Floyd–Warshall algorithm, Belman–Ford algorithm, Ford–Fulkerson algorithm, Kirchhoff matrices, connectivity model, generating Chomsky grammars, quasi-projection, Lie algebras, Lie groups, Zipf's law

Acknowledgments. The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of State Assignment No. FEUE-2023-0007.

For citation: Antonov V.V., Kulikov G.G., Voyakovskaya Ya.S., Palchevsky E.V. A method of forming the structures of digital doubles of domain-oriented objects in the open source space based on the formalisms of the theory of sets, graphs, category theory and the theory of generating Chomsky languages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(2):17–27. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230202

Введение

В данной статье будем рассматривать только свойства связности объектов в структуре цифрового двойника предметной области [1]. Математическое описание правил их формулирования представляет собой базу знаний, содержащую множество различных свойств и сопоставлений, что позволяет представить его в виде некоторого приближения к цифровому двойнику предметной области. Это открывает возможность выявления и дополнительного анализа различного вида

неявных квалификаций объектов. Таким образом, объекты рассматриваемой предметной области и представляют собой открытый исходный код, обладающий рядом свойств устойчивости, а также учитывающий эмерджентность и сингуляризацию потоков системы.

1. Математическая постановка задачи

Данный метод может быть доведен до формального алгоритма и представлен следующей последовательностью шагов.

1. Определение правил и алгоритмов на базе семантического отбора значимых для каждого объекта признаков (метод семантического дифференциала [2]), применения экспертных оценок и математического аппарата метода «разъезженного пути» М. Шульце [3].

2. Моделирование алгоритмов на графах, описывающих состояние системы в каждой записи и детализирующих структуру связей объекта, относящихся к формализованным семантическим признакам [4]. Выделение состояния структуры каркасов графов в свойства их связей, реинжиниринг и последующее генерирование деревьев графов по плотности связей, последующая алгоритмизация в искусственном интеллекте [5].

3. Построение проекций объектов (представленных в виде векторов) в новое пространство (назовем квазипроекцией). Данное пространство формируется с учетом правил формулирования признаков (мер), содержащихся в свойствах объектов предыдущего пункта.

4. Далее, учитывая, что объекты (точнее, их квазипроекции) помещены в единое пространство, можем провести исследование на предмет группировки их по категориям, определения линейной связности. Для этого используем известные математические аппараты алгебры Ли [6] и выявления тензорных взаимосвязей объектов.

2. Раскрытие метода решения задачи

С целью решения задачи, поставленной на первом шаге, в качестве способа для вычисления тех или иных признаков объекта, представляющих интерес для исследования, может быть предложен алгоритм Флойда – Уоршала, сочетающийся с любым предлагаемым алгоритмом второго шага. Он способен осуществлять поиск по выделенным условиям с транзитивным замыканием отношения в сочетании с методом М. Шульце, который, в свою очередь, также поддается алгоритмизации. Это позволяет сформулировать выборку данных для экспертных решений, которые могут быть определены по значимости признаков конкретного объекта, произвести ранжирование значений параметров на основании метода семантического дифференциала и формирования вектора признаков. Данные признаки будем использовать в качестве базиса формируемого пространства, где значения базисных векторов определяются путем построения лингвистических переменных по единой шкале определяемых правилами проекции объектов. На основании изложенного формируемое пространство учитывает и семантическую составляющую правил проекций, то есть является семантическим пространством признаков. Тогда, рассматривая некоторую лингвистическую переменную как $\langle A, T(A), U, V, M \rangle$, где A – название лингвистической переменной; $T(A)$ – терм-множество лингвистической переменной A ; V – грамматика в виде синтаксического правила (порождающее названия значений лингвистической переменной A); M – семантическое правило, ставящее каждой нечеткой переменной терм-множество из $T(A)$ некоторое нечеткое подмножество универсального множества U , можем сделать очевидные заключения.

1. Практически каждая лингвистическая переменная может иметь несколько терм-множеств, которые будут различными. Простой пример: $T_1(A) = \{\text{низкий, высокий}\}$, $T_2(A) = \{\text{низкий, средний, высокий}\}$, $T_3(A) = \{\text{низкий, высокий, очень высокий}\}$ и т. д. [7].

2. На основании этого семантика зависит от множества значений соответствующей лингвистической переменной.

3. Для функций принадлежности любого термина необходимо указать контекст.

Тогда семантическое пространство может быть описано как $S = \langle A, T(A), U, M \rangle$ (пропала V), т. е. семантическая переменная с фиксированным терм-множеством (согласно Л. Заде [8], множество нечетких переменных $\langle \alpha, U, G \rangle$, α – имя, G – семантика, ограниченная нечеткой переменной

α , U – область ее определения – как правило, универсальное множество) [7]. Таким образом, одна и та же лингвистическая переменная A будет принадлежать сразу нескольким пространствам.

$$S_i = \langle A, T_i(A), U, M_i \rangle \quad i = 1, \dots, n.$$

Решая проблему выбора оптимального пространства (точнее, минимальной неопределенности) описания интересующего объекта, приходим к новому пространству или пересечению интересующих нас пространств (S_j , S_k , соответственно):

$$S = S_j \cap S_k.$$

При проектировании программной системы задача сводится к формированию системы конверторов, выстраивающих нечеткое соответствие $T_j(A)$ и $T_k(A)$ в условиях построения комплексного нечеткого правила вывода для M_j и M_k . Все сводится к тому, что для каждого исследуемого объекта должно быть определено хотя бы одно понятие (из числа образующих ранее указанное семантическое пространство), описывающее объект с ненулевой степенью соответствия и открывающее возможность разделения понятий в разных пространствах и объединения их за счет семантически близких терминов в объединенном пространстве [9].

Используя изложенное, сформируем алгоритм решения обратной задачи идентификации объектов в соответствии с нечеткими пересечениями свойств объектов общего информационного пространства. Применим математический аппарат теории графов, который позволит выявить наиболее четкие связи объектов. Для начала нам необходимо данные об объекте привести в матричные структуры и осуществить для этого предварительную систематизацию записей. Имея четкую структуру матриц (в идеальном случае для исследования – детерминированную), мы определим минимальные графы в алгоритмах, допускающих такую обработку. На этом этапе важно определить все существующие записи о связях объекта, для чего используется алгоритм DFS/BFS, дающий возможность производить итерации для нахождения наикратчайшего пути в графах. Таким образом, мы произведем расчет деревьев графа в «глубину» и в «ширину». Обход графа в «глубину» полезен с целью проверки связности и сильной связности графа, а обход в «ширину» позволяет выделить путь графа от выбираемой вершины до смежных с ней, а от них, в свою очередь, к смежным с ними. Данную последовательность действий повторяем до тех пор, пока не будет найден весь каркас графа. Для более точной детализации структур связей производим выделение наиболее плотных связей в отдельную категорию, для которой и будет применяться алгоритм Прима (он также называется алгоритмом Ярника или Дейкстры) [10], осуществляющий расчет связей, в том числе дублированных (например, данные, повторяющиеся в разных временных проекциях). Критерий вхождения в указанную категорию может быть реализован в виде функции принадлежности – весовой функции (β -уровневые отношения предпочтения [4]). Для этого на вход алгоритма подается связный, но неориентированный граф, преобразованный по предыдущим расчетам в DFS/BFS. В исследованиях контента всегда имеют значения строго определенные характеристики объекта, получаемые в связях, поэтому для каждого ребра изначально задается соответствующий ему вес β -уровневых отношений. В дальнейшем такому выбору обучается искусственный интеллект. Вес значений может быть определен посредством внесения данных о толщине ребер, что соответствует принципу работы со связями. Далее, соответствуя этой цели, всегда при следующем шаге алгоритма выбираются только те ребра, которые выбраны как наибольшие, либо те, которые подразумевают такой выбор при новом шаге. Определяемое на каждом шаге ребро присоединяется к дереву графа, причем его каркас может быть пересчитан при последующем изменении его структуры. После проверки всех вершин и достижения условий их максимального охвата на связях данный алгоритм завершает работу.

В результате получаем новый каркас на связях графов, который фиксируется в системе, получает индекс (например i). В дальнейшем любые изменения исходных множеств реализуются в новых каркасах на связях графов, но уже с другими номерами индексов [11]. После описанных итераций становится возможным исключение ребер, не участвующих в проверенных связях. Тогда подграфы, исключаящиеся из дальнейших расчетов, позволяют ограничить требования к объемам памяти (проблема большой размерности) и вычислительных мощностей при дальнейших расчетах в алгоритмах. Если продолжать наше рассуждение о преобразовании графов, после алгоритма Прима мы вводим полученные данные в алгоритм Белмана – Форда [12], кото-

рый выбран по причине необходимости работы с сетью и проверок кратчайшего пути в графах (по Прима) для последующего преобразования каркасов взвешенного графа, вывода значений по описанным предварительным расчетам, в том числе с использованием операции слияния деревьев и вычисления спектров графов [13, 14].

Для перечисленной группы алгоритмов с целью запоминания всех исчислений применим алгоритм Форда – Фалкерсона [15]. Вычисления, заложенные в его основу, дают возможность решения задачи выделения максимального потока на каркасах графов аналогично ранее описанному методу определения критерия вхождения в категорию [4]. Этот шаг, как и предыдущий, может быть использован для построения структур графов в пространстве, соответствующих задаче данного исследования. Полученные результаты представимы в виде матриц Кирхгофа, которые предполагают работу с плоскостью через векторы и учитывают специфику структур спектров графов. Генерирование деревьев образованных графов сопровождается группированием признаков в матричную модель связности когнитивной карты [5]. Причем связность признаков в каркасе графа может быть подобрана с использованием методов искусственного интеллекта (например, применением искусственной нейронной сети) в новой системе отношений (в виде дерева – связного ориентированного ациклического графа). В зависимости от числа признаков значения матричных моделей связности преобразуются в модель позиционного взвешивания. Поставленная задача сводится к построению каркаса графа, при которой для выявления наиболее плотных связей может быть использована формула [16]:

$$\Gamma = \langle U_i, F_\Gamma, A, \theta, B_i, n \rangle, \quad (1)$$

где U_i – множество типов одной категории признаков;

$i = 1, \dots, k$, где k – количество множеств признаков;

$F_\Gamma = F_\Gamma(A, \theta)$ – множество альтернатив изменения объекта;

$A = \{a_i\}$ – множество отношений признаков (межтиповые отношения), $i = 1, \dots, l$, где l – количество множеств отношений;

θ – множество состояний каркаса;

B_i – множество правил изменения состояний каркаса, где $i = 1, \dots, m$ правила;

n – такт моделирования каркаса.

При изменении тактов моделирования изменяется конфигурация всей структуры. Эта формула может быть интерпретирована двумя операциями. Например, связи строятся в нескольких структурах, каждое дерево от своей первой вершины графа. Тогда с каждым тактом каркас деревьев будет дополняться новыми связями и строиться по спектрам графов. В формуле (1) уплотнение связей происходит по признакам семантически близких терминов, в противном случае алгоритм на графах пересчитывает структуры с самого начала по правилам B_i системного и семантического уровней. Последний из них зависит от формулирования синтаксического анализатора, где каждому множеству признаков присваиваются нетерминальные значения, полученные по правилам устанавливаемого алфавита порождающей грамматики Н. Хомского, а вложенность процедур этого уровня может быть подчинена рекурсивности его универсальной грамматики [17]. Для этого состояние системы в каждом такте может быть выделено как разность текущего и предыдущего состояния системы при условии, что последнее всегда либо больше, либо равносильно в совокупности значений выводимых спектров, для чего системный уровень отношений на каркасе для графа G определяется как сумма спектральных значений текущего и предыдущего состояний, а формулирование спектров следующим образом (представлен на примере трех рекурсивных вложенностей для $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{p-1}$):

$$Spec(G) = \begin{cases} q(\lambda_0), q(\lambda_1), \dots, q(\lambda_{q-1}) \\ r(\lambda_0), r(\lambda_1), \dots, r(\lambda_{r-1}), \\ s(\lambda_0), s(\lambda_1), \dots, s(\lambda_{s-1}) \end{cases}$$

$$(q, r, s) \in G(w),$$

$$p \leq w,$$

где λ – все собственные значения графа;

$w(\lambda)$ – все экстремумы значений q, r, s [18].

Предложенное сочетание алгоритмов позволит выделить каркасы графов в виртуальную структуру по принципу близости связей к объекту на основе свойств их рекурсивности, что удовлетворяет цели исследования. Согласно построению, граф будет вложенным и метрики графа будут иметь ненулевое значение. Необходимо поместить и занумеровать ребра тем или иным способом, а его вершины – строками длины из нулей и единиц (что соответствует самой простой матричной структуре) с четным числом единиц так, что квадрат евклидова расстояния между двумя такими строками вдвое больше длины пути, соединяющего вершины в графе. Так как граф (или произвольная метрика в конкретном случае) вложенный, то метрика кратчайшего пути является линейной комбинацией с неотрицательными коэффициентами разрезанных полуметрик [19]. Отсюда, возвращаясь к задаче построения нового каркаса на предложенных исчислениях, операции, переводящие один многогранник в структуру другого, сводятся к прямому произведению, построению призмы, вытягиванию, усечению, капингу, построению пирамиды, шамферингу и амбо-операции [19]. Могут быть построены проекции графов в пространстве, где исходными данными являются каркасы фуллеренов, полуправильные полиэдры, полуправильные n -многогранники. Полуправильногранный n -многогранник – это правильногранный n -многогранник с эквивалентными вершинами. Он также является квазиправильным, с транзитивными вершинами и ребрами и его проще всего использовать как при построении каркасов на графах, так и вычислении рекурсивной вложенности, которая, в свою очередь, легко рассчитывается как любой алгоритм по своим состояниям системы или ее отдельного объекта (в решениях семантики Крипке [20]). Для этого остается определить, каким образом может создаваться образ цифрового двойника открытых источников в получаемых значениях рекурсивных вложенностей. Для этого используем квазипроекцию – отображение объектов рекурсии в себя, которое на образе этих рекурсий в схожих алгоритмах определяется аналогично и может быть основанием для проекции из риманова пространства, для чего значения (1) в тензорных размерностях транспонируются в римановом пространстве, определяемом набором объектов и отношений между объектами, которые также определяются набором функций. Далее для переноса может быть использована категория *Matrk* [21] из значений, полученных в *Matr_{n*m}(k)*, что также может быть получено из спектров графов [22] и интерпретировано далее как как нетеровы кольца и гладкие алгебры [23, 24]). И тогда происходит перенос свойств графов в топологическом смысле из гомеоморфизмов на эндоморфизмы – морфизмы объекта категории в себя с основными свойствами, что не противоречит формулированию рекурсий, однако добавляет новые правила через функторы на основе перебора. Следовательно, наша задача определяется множеством функций, описывающих отношения этих объектов в пространстве. Тогда можно определить поверхность как набор решений системы функций, которые принимают ненулевое значение и возможно объединение множества правил в кластер или категорию для сопоставления одной метрики с другими, смежными с ней. То есть метрики разных объектов будут согласованы. Мы берем метрический тензор в базе, как правило, вычисления длины любого вектора. Описанное предложение становится допустимым для интерпретации, и следует вывод о возможности создания алгоритмов переноса на заданные условия для систем, а том числе если требуется ввод обратного тензора для поля в отрицательных векторных значениях, что обозначает возможность сжатия в точку или наличие обратной функции. Основанием для таких алгоритмов может послужить вводимый для этих условий математический аппарат на алгебрах Ли и группах Ли.

Суть в том, что для воссоздания нужной структуры связей в проекциях остается одна неопределенность в вычислениях системы – итерационный ввод значений и создание универсальных покрытий, создающих образ данных на плоскости. Наиболее доступными для этих целей и являются алгебры Ли и группы Ли, к которым мы обращаемся на основании выведенных алгоритмов. Гомоморфизм алгебры Ли может быть представлен в образе объекта через подалгебры Ли при условии естественного преобразования проекцией [25]. Они представимы в самом простом виде через коммутативные диаграммы, которые также могут быть подчинены правилам работы с рекурсиями, а также функторами. При работе с категориями используется функтор Ли, когда это представимо в произвольном гомоморфизме групп, так как выводимое поле связано. И тогда для любого вводимого функционального отношения имеет место стандартный ассоциативный закон,

который просто использовать в отношении множеств различных объектов, особенно если они касаются категорий.

При условии же применения алгебры Ли над полем предположим гомоморфизмы алгебр Ли, и если отображения являются линейными, то они могут оперировать с векторными пространствами. Если алгебры Ли небольшой размерности, выводят скаляры структурных констант относительно их базисов, а также тензоры, предложенные нами ранее. Так как данные до ввода в пространство представляют собой спектры графов, упорядоченные в детерминантных матрицах, то работа на свойствах изоморфности спектров сводится к преобразованию композиций матриц – невырожденных и ортогональных. При этом, так как базисы могут быть представлены даже в виде структурного уравнения, множества спектров также определимы в алгебрах Ли, которые могут быть изоморфны n -мерным алгебрам Ли вместе с векторным произведением. Теперь, возвращаясь к основным алгоритмам, следует заметить, что описываемые в алгебрах и группах Ли системы предполагают возможность сравнения деревьев графа с другими деревьями и построение новых объектов, а также выделение ранее неопределенных связностей. Таким образом, с помощью этого шага и образуются новые виды каркасов графов, помимо рекурсий, которые естественным образом появляются при расчете каждого утолщения (сложения ребер) в соответствующих алгоритмах.

После моделирования сочетаний алгоритмов на графах также могут быть получены матрицы алгебры Ли и выведены функторы для воспроизведения данных записей как структур связности. Связность может быть определена в каждой плоскости формы со значениями семантики в алгебре Ли комплексной линейной группы. Такие группы всегда могут быть обратно привязаны к записям, так как они представимы в матричной форме и выполнимо условие комплексной линейной связности в квазипроециях. Для стандартной матрицы, элементами которой являются линейные формы в точке x , возможно представить связность как некоторую окрестность U формы $\omega_U = (\omega_j^i)$ при условии $(i, j = 1, \dots, m; i \neq j)$ со значениями в алгебре Ли комплексной линейной группы [26]. Отсюда справедливо, что если точка x с комплексными значениями будет иметь $U \cap V \neq \emptyset$, такая матрица переведет точечный базис из U в V , что также справедливо для вывода образа в квазипроекции. В общей же системе правил мы проектируем пространства, задавая признаки (меры), содержащиеся в записях базовых исчислений транзитивности, которые по свойствам подчинены формулированию категорий, снабженных по своей природе морфизмами. Переносимое свойство в этом случае может быть описано в отношениях морфизмов, которые выделяются как отдельная математическая структура, полученная из связей, выделенных ранее как виртуальный объект, переведенных далее в функторы и преобразованных в связанные алгоритмы.

3. Анализ полученных результатов

Открытые источники являются триггерами экономического роста во всех развитых странах. Их исследования позволяют компаниям не только эффективно влиять на мировую экономику, но и решать свои собственные текущие проблемы. Метод, предложенный в этом материале, позволяет спроектировать структуру цифрового двойника для задач различного назначения, а также обеспечить протоколирование запросов, агрегацию, композицию и накопление данных, анализ больших данных, эмерджентное разделение и сингуляризацию потоков.

Отношения между предметно-ориентированной областью (ПОО), состоящей из множества объектов и связей между ними, знания о ПОО, существующие в открытом Internet-пространстве (ИП), и знания о ПОО и ИП у лица, принимающего решение (ЛПР), порождает семантические (функторные, нелинейные – логические) связи, выражаемые виртуальными объектами. Общей системной моделью этих трех областей может быть порождающий предметно-ориентированный мета-язык, который позволит сформировать грамматически правильные алгоритмы для ЛПР.

Учитывая, что первоначальные знания представляются в форме контента на естественном языке, где их частотная характеристика определяется законом Ципфа [27], для дальнейшего формирования метрических пространств необходимо, чтобы рассмотренные в статье нечеткие множества сохраняли групповые свойства при их изоморфном или гомоморфном отображении. Для соблюдения этих требований необходимо расширить частотный анализ контента на естественном языке по характеристикам синонимии и антонимии.

Заключение

Для нас исследования продолжают по настоящее время, и главной целью является возможность обучения искусственного интеллекта собственному выбору на экспертном уровне, выявление зависимостей между различными пространствами. Эта область мало изучена, поэтому существует огромное количество вопросов с точки зрения математики, на которые приходится искать новые нестандартные решения. Также сложностью является достаточность объема входных данных, получаемых из открытых источников. По этой причине наши вычисления чаще всего основываются на открытых данных социальных сетей как наиболее содержательных с этой точки зрения. Следует отметить, что все приведенные алгоритмы являются лишь набором для решения задач связности объектов и для выведения других характеристик возможно предложить другие их сочетания и комбинации алгоритмов, не описанные в этом материале.

Предложенная методика формального грамматического исчисления, основанная на порождающей грамматике Н. Хомского, может быть реализована с применением информационных технологий кроссплатформенного программирования и языков высокоуровневого программирования типа BPMN, OWL и др.

Список литературы

1. Работа с открытыми данными: особенности публикации и использования в российском правовом поле. Аналитический доклад. URL: <https://www.infoculture.ru/wp-content/uploads/2020/11/OpenDataReview.pdf>.
2. Berlanga R., Jiménez-Ruiz E., Nebot V. Exploring and linking biomedical resources through multidimensional semantic spaces // *Semantic Web Applications and Tools for Life Sciences (SWAT4LS) 2010*. Berlin, Germany, 10 December 2010. DOI: 10.1186/1471-2105-13-S1-S6
3. Куроткин В.А. Применение итерационного алгоритма Шульца в рекуррентных алгоритмах параметрической идентификации // *Молодой ученый*. 2014. № 18 (77). С. 251–255.
4. Антонов В.В., Куликов Г.Г., Антонов Д.В. Теоретические и прикладные аспекты построения моделей информ. систем. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany, 2011. 144 с.
5. Горелова И.С. Позиционные игры на взаимодействующих когнитивных моделях // *Труды 6-й Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций»*. 2006. С. 185–191.
6. Катанаев М.О. Геометрические методы в математической физике. Приложения в квантовой механике. Часть 2 // *Лекционные курсы НОЦ*. Вып. 26. М.: МИАН, 2015. 186 с. ISBN 978-5-98419-066-4, DOI: 10.4213/book1604
7. Павлов С.Н. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие: в 2 ч. Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. Ч. 1. 175 с.
8. Zadeh L.A. Fuzzy Sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8, iss. 3. P. 338–353.
9. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. 2-е изд. М.: Издат. дом «Вильямс», 2013. С. 653–656.
10. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V. Semantic-mathematical a subject domain for designing system of the allocated data processing // *15-я Международная конференция «Компьютерные науки и информационные технологии» (CSIT'2013)*. 2013. Т. 1. С. 251–254.
11. Ford L.R. Jr., Fulkerson D.R. *Flows in Networks*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1962. 194 p. ISBN: 978-0-691-14667-6
12. Kumar K., Namboodiri M.N.N., Serra-Capizzano S. Perturbation of operators and approximation of spectrum // *Proceedings of the Indian Academy of Sciences: Mathematical Sciences*. 2014. Vol. 124. P. 205–224. DOI: 10.1007/s12044-014-0169-4
13. Van der Hofstad R. *Random Graphs and Complex Networks*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 337 p. DOI: 10.1017/9781316779422
14. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Томас Кормен [и др.]. 3-е изд. М.: Вильямс, 2013. 1323 с. ISBN 978-5-8459-1794-2.
15. Печаткин В.В., Михайлова Я.С. Методологический подход к оценке индикаторов экономической безопасности территориальных систем в условиях глобальных вызовов // *Обще-*

ственная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2017. Вып. 3, ч. 2. С. 269–276.

16. Fitch W.T., Hauser M.D., Chomsky N. The evolution of the language faculty: Clarifications and implications // *Cognition*. 2005. Vol. 97 (2). P. 179–210. DOI: 10.1016/j.cognition.2005.02.005

17. Antonov V.V., Voyakovskaya Y.S., Suvorova V.A. Method for Determining the Digital Twin Structure of Distributed Open Sources // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russian Federation; 2022. P. 881–885. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896354

18. Деза М., Гришухин В.П., Штогрин М.И. Изометрические полиэдральные подграфы в гиперкубах и кубических решетках: моногр.: пер. с англ. М.: МЦНМО, 2008. 192 с. ISBN 978-5-94057-363-0.

19. Оноприенко А.А. Семантика типа Крипке для пропозициональной логики задач и высказываний // Математический сборник. 2020. Т. 211, № 5. С. 98–125. DOI: 10.4213/sm9275

20. Маклейн С. Категории для работающего математика: пер. с англ. М.: Физматлит, 2004. 352 с. ISBN 5-9221-0400-4.

21. Beasley L.B., Kang K.-T., Song S.-Z. Linear operators that preserve sets of primitive matrices // *Journal of the Korean Mathematical Society*. 2014. Vol. 51, no. 4. P. 773–789.

22. Masayoshi Nagata. *Local Rings*. New York, London: John Wiley & Sons, 1962. 234 p. (Interscience Tracts in Pure and Applied Mathematics. Number 13).

23. Badawi A., Coykendall J. (Eds.). *Advances in Commutative Algebra: Dedicated to David F. Anderson*. Springer, 2019. 280 p. (Trends in Mathematics). ISBN 978-981-13-7027-4.

24. Исаев А.П., Рубаков В.А. Теория групп и симметрий. Книга 1: Конечные группы. Группы и алгебры Ли. Изд. 2, испр. и доп. URSS, 2022. 504 с. ISBN 978-5-9710-9321-3.

25. Лихнерович А. Теория связностей в целом и группы голономий / пер. с фр. С.П. Финикова; под ред. В.В. Рыжкова. М.: Изд-во иностр. лит., 1997. 216 с. ISBN 978-5-80100-224-8.

26. Манин Ю.И. Закон Ципфа и вероятностные распределения Левина // Функциональный анализ и его приложения. 2014. Т. 48, № 2. С. 51–66. DOI: Mi faa3141

References

1. *Rabota s otkrytymi dannymi: osobennosti publikatsii i ispol'zovaniya v rossiyskom pravovom pole. Analiticheskiy doklad* [Working with open data: features of publication and use in the Russian legal field. Analytical document]. (In Russ.) Available at: <https://www.infoculture.ru/wp-content/uploads/2020/11/OpenDataReview.pdf>.

2. Berlanga R., Jiménez-Ruiz E., Nebot V. Exploring and linking biomedical resources through multidimensional semantic spaces. *Semantic Web Applications and Tools for Life Sciences (SWAT4LS) 2010*. Berlin, Germany, 10 December 2010. DOI: 10.1186/1471-2105-13-S1-S6

3. Kurotkin V.A. [Application of the Schultz iterative algorithm in recurrent parametric identification algorithms]. *Young scientist*. 2014;18(77):251–255. (In Russ.)

4. Antonov V.V., Kulikov G.G., Antonov D.V. *Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty postroyeniya modeley informatsionnykh sistem* [Theoretical and applied aspects of constructing inform models systems]. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany; 2011. 144 p. (In Russ.)

5. Gorelova I.S. [Positional games on interacting cognitive models]. In: *Trudy 6-y Mezhdunarodnoy konferentsii "Kognitivnyy analiz i upravleniye razvitiyem situatsiy"* [Proceedings of the 6th International Conference "Cognitive analysis and Situation Development Management"]; 2006. P. 185–191. (In Russ.)

6. Katanaev M.O. Geometrical methods in mathematical physics. Applications in quantum mechanics. Part 2. In: *Lekts. Kursy NOC*. Moscow: Steklov Math. Institute of RAS; 2015. Iss. 26. 186 p. (In Russ.) ISBN 978-5-98419-066-4, DOI: 10.4213/book1604

7. Pavlov S.N. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: ucheb. posobiye: v 2 ch.* [Artificial intelligence systems: a textbook]. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 2011. Part. 1. 175 p. (In Russ.)

8. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338–353.

9. Cormen T., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. *Introduction to algorithms*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Vil'yams Publ., 2013. P. 653–656. (In Russ.)
10. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V. Semantic-mathematical a subject domain for designing system of the allocated data processing. In: *The 15th International workshop on computer science and information technologies (CSIT'2013)*. 2013. Vol. 1. P. 251–254.
11. Ford L.R. Jr., Fulkerson D.R. *Flows in Networks*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1962. 194 p. ISBN: 978-0-691-14667-6.
12. Kumar K., Namboodiri M.N.N., Serra-Capizzano S. Perturbation of operators and approximation of spectrum. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences: Mathematical Sciences*. 2014. Vol. 124. P. 205–224. DOI: 10.1007/s12044-014-0169-4
13. Van der Hofstad R. *Random Graphs and Complex Networks. Vol. 1*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 337 p. DOI: 10.1017/9781316779422
14. Cormen T.H. et al. *Introduction to algorithms*. 3rd ed. Cambridge, Massachusetts etc.: The MIT Press; 2009. ISBN 978-0-2620-3384-8.
15. Pechatkin V.V., Mikhaylova Ya.S. [Methodological approach to the assessment of indicators of economic security of territorial systems in the context of global challenges]. *Obshchestvennaya bezopasnost', zakonnost' i pravoporyadok v III tysyacheletii* [Public security, law and order in the third millennium]. 2017;3(2):269–276. (In Russ.)
16. Fitch W.T., Hauser M.D., Chomsky N. The evolution of the language faculty: Clarifications and implications. *Cognition*. 2005;97(2):179–210. DOI: 10.1016/j.cognition.2005.02.005
17. Antonov V.V., Voyakovskaya Y.S., Suvorova V.A. Method for Determining the Digital Twin Structure of Distributed Open Sources. *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, Russian Federation; 2022. P. 881–885. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896354
18. Deza M., Grishukhin V., Shtogrin M. *Scale-isometric polytopal graphs in hypercubes and cubic lattices. Polytopes in hypercubes and Zn*. London: Imperial College Press., 2004. 188 p. ISBN 978-1-86094-421-5, DOI: 10.1142/p308
19. Onoprienko A.A. Kripke semantics for the logic of problems and propositions. *Sbornik: Mathematics*. 2020;211(5):709–732. DOI: 10.1070/SM9275
20. Mac Lane S. *Categories for the working mathematician*. Springer-Verlag; 1998. 314 p. ISBN 0-387-98403-8.
21. Beasley L.B., Kang K.-T., Song S.-Z. Linear operators that preserve sets of primitive matrices. *Journal of the Korean Mathematical Society*. 2014;51(4):773–789.
22. Masayoshi Nagata. *Local Rings*. New York, London: John Wiley & Sons, 1962. 234 p. (Inter-science Tracts in Pure and Applied Mathematics. Number 13).
23. Badawi A., Coykendall J. (Eds.). *Advances in Commutative Algebra: Dedicated to David F. Anderson*. Springer, 2019. 280 p. (Trends in Mathematics). ISBN 978-981-13-7027-4.
24. Isayev A.P., Rubakov V.A. *Teoriya grupp i simmetriy. Kniga 1: Konechnyye gruppy. Gruppy i algebrы Li* [Theory of groups and symmetries. Book 1: Finite Groups. Lie groups and algebras]. Ed. 2, corrected and supplemented. URSS; 2022. 504 p. (In Russ.) ISBN 978-5-9710-9321-3
25. Lichnerowicz, André. *Théorie Globale Des Connexions Et Des Groupes D'holonomie*. Roma: Edizioni cremonese, 1955.
26. Manin Yu.I. Zipf's Law and L. Levin Probability Distributions. *Functional Analysis and Its Applications*. 2014;48(2):116–127. DOI: 10.1007/s10688-014-0052-1

Информация об авторах

Антонов Вячеслав Викторович, д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; antonov.v@bashkortostan.ru.

Куликов Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; gennadyg_98@yahoo.com.

Вояковская Яна Станиславовна, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; in.edem@yandex.ru.

Пальчевский Евгений Владимирович, преподаватель, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; teelxp@inbox.ru.

Information about the authors

Vyacheslav V. Antonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, antonov.v@bashkortostan.ru.

Gennady G. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, gennadyg_98@yahoo.com.

Yana S. Voyakovskaya, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, in.edem@yandex.ru.

Evgeny V. Palchevsky, Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, teelxp@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 07.02.2023

The article was submitted 07.02.2023

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧИХ НА ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОСНОВЕ OREN CV И АЛГОРИТМА ОДНОСТАДИЙНОГО ДЕТЕКТОРА

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

А.А. Шинкарев², sania.kill@mail.ru

М.Е. Коваль¹, kovalmax06@gmail.com

М.В. Ядрышникова¹, reeyardma@gmail.com

Д.В. Стародубцев¹, starodubtcev.d.v@gmail.com

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Индивидуальный предприниматель Шинкарев А.А., Челябинск, Россия

Аннотация. Известно, что компании стараются сократить свои затраты на производство. Одним из эффективных способов сокращения затрат является автоматизация процессов. Например, замещение сотрудников различными роботами или информационными системами. Зачастую при строительстве или другом масштабном производстве требуется мониторинг работы сотрудников. В самом простом варианте мониторинг может осуществляться с помощью видеокамер и сотрудников, которые просматривают записи с этих камер. Это влечет за собой затраты на оплату труда сотрудников, налоги и другие отчисления. Изменить такой процесс мониторинга можно с помощью систем слежения за перемещением рабочих. Внедрив такую информационную систему в производство, можно сократить расходы, которые были описаны выше. На сегодняшний день алгоритмы машинного обучения и компьютерного зрения довольно сильно развились и позволяют реализовывать такие системы слежения. Существуют уже готовые варианты систем слежения на базе алгоритмов компьютерного зрения, но они имеют высокую стоимость, что подходит только для крупных производств. Другим вариантом является разработка собственной системы слежения, которая будет учитывать специфику организации, в которой планируется ее внедрение. **Цель исследования:** рассмотреть технологии, с помощью которых можно построить систему слежения, и предложить реализацию системы слежения за рабочими с применением алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. **Материалы и методы.** Рассматриваются существующие решения систем мониторинга на базе технологий RFID, компьютерного зрения, GPS и датчиков движения. Приводятся их плюсы и минусы. Рассматриваются существующие способы для детекции движения с использованием компьютерного зрения. Приводится обзор существующих алгоритмов для обнаружения рабочего в специализированном костюме. Рассматривается алгоритм YOLOv5, который состоит из *backbone*, *neck* и *head*. **Результаты.** В статье авторами приводится описание рассматриваемых алгоритмов машинного обучения, компьютерного зрения и нейронных сетей. Предлагается реализация системы мониторинга за рабочими. Дается описание модулей, из которых состоит система слежения, приводится схема взаимодействия модулей. Описывается разработка алгоритма детекции движения и алгоритма определения рабочего в специальной форме.

Ключевые слова: автоматизация систем, машинное обучение, компьютерное зрение, нейронные сети, детекция движения, одностадийный детектор, YOLO, алгоритм обрезки видео

Для цитирования: Разработка системы определения перемещения рабочих на производстве на основе OrenCV и алгоритма одностадийного детектора / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев, М.Е. Коваль и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 28–39. DOI: 10.14529/ctcr230203

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR DETECTING MOVEMENTS OF WORKERS IN WORKPLACE BASED ON OPENCV AND ONE-STAGE DETECTOR ALGORITHM

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

A.A. Shinkarev², sania.kill@mail.ru

M.E. Koval¹, kovalmax06@gmail.com

M.V. Yadryshnikova¹, reeyardma@gmail.com

D.V. Starodubtcev¹, starodubtcev.d.v@gmail.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Sole proprietor Shinkarev A.A., Chelyabinsk, Russia

Abstract. It is a known fact that companies strive to cut their production costs. One of the most effective ways to reduce costs is to automate processes, for example, replacing employees with various robots or information systems. Often, at a construction site or a large-scale production, it is necessary to monitor employees' work. In its simplest form, monitoring can be carried out with the help of video cameras and people who view recordings from these cameras. However, this entails labor costs, taxes and other expenses. So, what one can do instead is introduce a system that tracks movements of workers, which will likely reduce the costs described above. To this day, machine learning and computer vision algorithms have developed quite strongly and allow the implementation of such tracking systems. There are already ready-made versions of tracking systems based on computer vision algorithms, but they are expensive, which makes them suitable only for large-scale industries. Another option is to develop your own tracking system, taking into account the nature of the business in which you plan to implement it. **Aim.** The authors aim at analyzing technologies that can be used to develop a system for tracking workers' movements and proposing an implementation of such a system using machine learning algorithms and neural networks. **Materials and methods.** The authors give an overview of current solutions of monitoring systems based on RFID technologies, computer vision, GPS, and motion sensors, highlighting their pros and cons. The authors consider existing methods for motion detection based on computer vision and review known algorithms for detecting workers in special clothing. The YOLOv5 algorithm, consisting of backbone, neck and head, is considered in detail. **Results.** In the article, the authors provide a description of algorithms used for machine learning, computer vision, and neural networks. They propose an implementation of a system monitoring workers' movements. They describe the modules that make up the tracking system and a diagram of the interaction of the modules, as well as the development of a motion detection algorithm and an algorithm for determining workers in special clothing.

Keywords: system automation, machine learning, computer vision, neural networks, motion detection, one-stage detector, YOLO, video cropping algorithm

For citation: Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A., Koval M.E., Yadryshnikova M.V., Starodubtcev D.V. Development of system for detecting movements of workers in workplace based on OpenCV and one-stage detector algorithm. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):28–39. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230203

Введение

В настоящее время автоматизация производственных процессов является одним из основных трендов в промышленности. Реализация системы слежения за перемещением рабочих на производстве считается одним из ключевых шагов в этом направлении. Она позволяет увеличить эффективность производства, снизить затраты на оплату труда и сократить количество ошибок, возникших из-за человеческого фактора.

Реализация системы слежения за перемещением рабочих на производстве является необходимой мерой для современных предприятий, которые стремятся к оптимизации своей работы и повышению конкурентоспособности на рынке. Круглосуточное слежение за процессами, происходящими на производстве, требует финансовых затрат на обеспечение рабочих, наблюдающих

за процессом через видеокамеры, а также временных затрат, связанных с ежедневным просмотром большого количества накопившегося видеоматериала и его хранения.

Решить эту проблему может помочь система, которая позволяет выделять и сохранять необходимые части видеопотока, на которых происходят конкретные действия. Это поможет оптимизировать рабочие процессы, выявить уязвимости или провести оценку полезного времени рабочих в течение рабочего дня.

Данная система может помочь в решении следующих задач:

- 1) сокращение финансовых затрат для найма избыточной рабочей силы для отслеживания процессов на производстве;
- 2) оптимизация хранения видеоданных, содержащих информацию о рабочих процессах;
- 3) оптимизация процесса отслеживания рабочего времени сотрудников предприятия;
- 4) предотвращение воровства и других правонарушений на предприятии, а именно в технических помещениях;
- 5) отслеживание приезда технических служб и других наемных рабочих со стороны.

Подобная система является комплексом решений, которые по отдельности решают конкретные задачи, связанные с обнаружением движения в помещениях, слежением за рабочими разных специальностей и классификацией объектов. Помимо этого, подобная система должна уметь определять произошедшее событие и сохранить информацию о нем. Далее в статье рассматриваются подходы для разработки подобной системы, а также приводится пример архитектуры системы для определения перемещения рабочих на предприятии.

1. Обзор существующих решений

Существует несколько аналогов систем распознавания перемещения рабочих на производстве. Каждая из этих систем имеет свои преимущества и недостатки. Выбор системы зависит от конкретных условий и требований производства.

1.1. RFID

Одним из таких аналогов является система автоматического перемещения рабочих на производстве, которая использует технологию RFID (Radio-Frequency Identification). Система RFID позволяет автоматически отслеживать перемещение рабочих на производстве и управлять производственным оборудованием в соответствии с требованиями производственного процесса. Эта система позволяет значительно снизить время на слежение за перемещениями рабочих на производстве, что повышает производительность и эффективность работы предприятия. Однако стоимость установки системы RFID может быть высокой, что может снизить экономическую эффективность проекта [1].

1.2. Компьютерное зрение

Другим аналогом является система управления производственным процессом на основе технологии машинного зрения. Эта система позволяет автоматически отслеживать перемещение рабочих на производстве и управлять производственным оборудованием в соответствии с требованиями производственного процесса. Система машинного зрения может быть более эффективной, чем система RFID, так как она позволяет более точно определять перемещение рабочих на производстве и управлять производственным оборудованием с большей точностью. Однако стоимость установки и настройки системы машинного зрения может быть высокой, что также может снизить экономическую эффективность проекта.

1.3. GPS

Кроме того, существуют также системы отслеживания движения рабочих, которые используют технологию GPS для определения местоположения рабочих на производстве и управления их перемещением [2]. Эта система может быть эффективной в тех случаях, когда перемещение рабочих происходит на больших территориях, таких как строительные площадки или склады. Однако в помещениях, где сигнал может быть затруднен, применение технологии GPS ограничено.

1.4. Датчики движения

Также стоит упомянуть о физических устройствах, которые фиксируют перемещение объектов, – датчики движения. Такие устройства сигнализируют о движении в определенной зоне видимости и могут быть полезны для наблюдения за небольшими помещениями [3]. Но стоит отметить, что подобные системы имеют ограниченный функционал, не обеспечивающий обработку сложных задач, таких как точное отслеживание перемещений рабочих на производстве, а только могут уведомлять о любых перемещениях в наблюдаемой зоне.

Таким образом, каждая из этих систем имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретной системы зависит от конкретных условий и требований производства. Далее в статье рассматривается система на основе машинного зрения для определения движения рабочих на производстве, так как данный подход не требует специализированного оборудования, его можно реализовать с помощью ip-камер, которые скорее всего уже установлены на предприятии. В качестве реального примера в статье рассматривается разработанное нами решение для использования на производстве, цели которого заключались в сохранении видео в периоды использования помещения рабочими и слежении за движением рабочего в специализированном костюме.

2. Описание системы

2.1. Составные части системы. Архитектура

Для реализации системы, которая будет решать описанные во введении проблемы, понадобятся следующие модули.

1. Модуль распределения процессов слежения за несколькими камерами и назначения обработчика определенного типа.

Данный модуль получает информацию о камерах, за которыми необходимо настроить наблюдение, и в зависимости от типа события, которое необходимо определить на видеопотоке, назначает обработчик полученного типа события. Модуль предоставляет возможность параллельной обработки потока кадров с нескольких видеокамер.

2. Модуль для считывания кадров из видеопотока.

Пользователь должен передать ссылку для подключения к видеопотоку с камеры и тип считываемого события. Представленный модуль позволяет получать информацию о видеопотоке с видеокамеры, в том числе отдельные видеокadres, которые далее передаются в модуль обработки.

3. Модуль для обработки полученных кадров из видеопотока.

На вход модуля подается кадр из модуля считывания, который необходимо обработать в соответствии с типом входного события. Данный модуль должен возвращать информацию о том, есть ли событие на кадре, которое необходимо определить, и передавать кадр в модуль для записи отрезков видео.

4. Модуль для записи отрезков видео, на которых обнаружены события.

В качестве входных данных подается кадр видеопотока и информация о том, было ли определенное событие обнаружено на этом кадре. После этого данный модуль объединяет полученные кадры в видео при нахождении на кадрах событий и формирует объект события, содержащий общую информацию, например время и дату начала и конца события, которое будет необходимо записать в базу данных. Сформированное событие подается в модуль отправки информации о событии в базу данных, а сформированное видео передается в модуль для сохранения видеозаписи в хранилище.

5. Модуль сохранения информации о событии в базу данных на сервере.

На вход этого модуля приходит объект события, в котором описана ключевая информация о событии: время начала и конца события, тип события, камера, с которой событие было зафиксировано, а также ссылка на видео в хранилище данных. Модуль сохраняет полученный объект в базу данных.

6. Модуль сохранения видеофайла с событием в хранилище.

Данный модуль принимает на вход видео, содержащее обнаруженное событие. Модуль формирует наименование для видео и путь до файла внутри хранилища, после чего помещает видео по сформированному пути.

На рис. 1 изображена схема взаимодействия описанных модулей.



Рис. 1. Схема аутентификации на основе многоразового пароля
Fig. 1. Reusable Password Authentication Scheme

3. Обзор существующих способов для детекции движения с использованием компьютерного зрения

Задачу детекции движения на видеопотоке можно решать несколькими способами. В системах, применяющих компьютерное зрение, чаще всего используются следующие методы:

- 1) нейронные сети для детектирования человека в кадре;
- 2) выявление критичных изменений в последовательности кадров из видеоряда.

Эти методы сильно различаются по сложности реализации и интеграции в систему на основе компьютерного зрения.

Среди преимуществ подхода, использующего нейронные сети для нахождения человека в кадре, можно выделить следующие:

- 1) более качественное распознавание движения: не каждое изменение в кадре будет определяться как движение, только появление человека на сцене будет идентифицировано как подходящее под эту категорию;
- 2) возможность разделить рабочих в кадре по их форме на классы: в таком случае будет учитываться не только сам факт движения на видеоряде, но и профиль рабочего, находящегося в помещении с установленной камерой.

Среди минусов такого подхода можно выделить:

- 1) более высокое потребление мощностей устройства, на котором будет размещена система с применением нейросетевых алгоритмов;
- 2) необходимость в формировании набора данных для обучения нейронной сети: при желании классифицировать рабочих по специализированной рабочей форме такой набор данных не-

обходимо собирать для каждого предприятия индивидуально и размечать в соответствии с типами рабочих, задействованных на производстве;

3) настройка архитектуры нейронной сети для быстроты классификации, приближенной к реальному времени.

С другой стороны, решить задачу определения движения в помещении с помощью компьютерного зрения можно более оптимальным способом при использовании алгоритма, который сравнивает поступающие с видеопотока кадры и определяет, насколько сильно новые кадры отличаются от более ранних.

Такой подход избавляет почти от всех минусов использования нейронных сетей, но при этом он имеет несколько недостатков.

1. Детектирование движения в помещении происходит при любых изменениях в кадре: не обязательно в помещении будет двигаться именно человек, идентифицироваться как движение будут также резкие изменения света или перемещение предметов.

2. Нет возможности классифицировать дополнительные признаки движения, можно лишь определить, было движение в кадре или нет.

Оптимально выбрать подход, который подойдет для решения, можно, лишь установив цель применения алгоритма.

3.1. Выбор алгоритма для детекции движения

Как уже было сказано во введении, для рассматриваемой системы стояла следующая цель: сохранить участки видеопотока в периоды использования помещения рабочими. В остальное время было исключено перемещение предметов или резкое изменение света на сцене. В данном случае оптимальным выбором стал алгоритм, базирующийся на сравнении кадров. Самым популярным инструментом для обработки видеок кадров является библиотека OpenCV [4], которая предоставляет алгоритмы компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения.

Данный способ является одной из возможных реализаций в модуле обработки кадров в нашей системе.

Для реализации такого алгоритма необходимо выполнить следующие шаги.

1. К поступившему кадру применить размытие по Гауссу [5] с помощью функции *blur* библиотеки OpenCV, чтобы избавиться от артефактов и смазок кадров, которые возникают при использовании нестабильного оборудования и могут быть ошибочно приняты алгоритмом за движение.

2. Перевести кадр в градации серых тонов с помощью функции *cvtColor*, поскольку это облегчит дальнейшую обработку изображения: определять изменения в кадре на уровне пикселей проще, используя одноканальную модель представления изображения [6], а не сравнивая все каналы.

3. Необходимо всегда хранить «усредненный» кадр (скользящее среднее), с которым будет проводиться сравнение вновь поступивших кадров. Этот кадр строится на основе предыдущей цепочки кадров. При каждом новом поступлении кадра нужно рассчитывать новое скользящее среднее. Достигнуть этой цели можно с применением функции *accumulateWeighted*.

4. После этого необходимо сравнить новое скользящее среднее и поступивший кадр с применением *absdiff*. Эта функция вычисляет абсолютную разницу между двумя массивами, в нашем случае кадрами, и возвращает кадр с подсвеченными пикселями, различающимися на изображении.

5. Затем с использованием функции *threshold* применить порог фиксированного уровня к полученному на шаге 4 изображению и получить бинарное изображение, состоящее только из черных и белых пикселей: на таком изображении понятно, в каких местах происходили серьезные изменения, а порог в таком случае необходимо устанавливать экспериментальным путем.

6. После этого применить функцию *dilate* к изображению, чтобы объединить некоторые разорванные куски после использования порогового фильтра, чтобы более явно была обозначена разница кадров.

7. Затем с помощью функции *findContours* найти на изображении, полученном в шаге 6, контуры изменений [7].

8. В цикле по всем найденным контурам установить условие, которое проверяет, что площадь контура больше, чем минимально заданная площадь: подбирать минимально заданную площадь также следует экспериментальным путем.

9. Считается, что при наличии контура больше заданной минимальной площади в кадре происходило движение. Найти положение этого контура на изображении можно с помощью функции *boundingRect*, а выделить этот контур на исходном кадре, пришедшем с видеопотока, с помощью функции *rectangle*.

В кадре возможно присутствие участков, которые могут содержать движения, но их нежелательно отслеживать. Такими участками могут быть окна, дверные проемы и т. п. В таких случаях необходимо определить координаты нежелательных для рассмотрения участков и зафиксировать состояние пикселей, что позволит избежать ложных срабатываний в процессе определения усредненного кадра, или при обработке контуров не учитывать те, которые входят в состав таких областей.

Пример срабатывания алгоритма в условиях производства можно увидеть на рис. 2 (ист. <https://mixkit.co/free-stock-video-/doctor-wearing-mask-and-gloves-for-protection-4745/>).

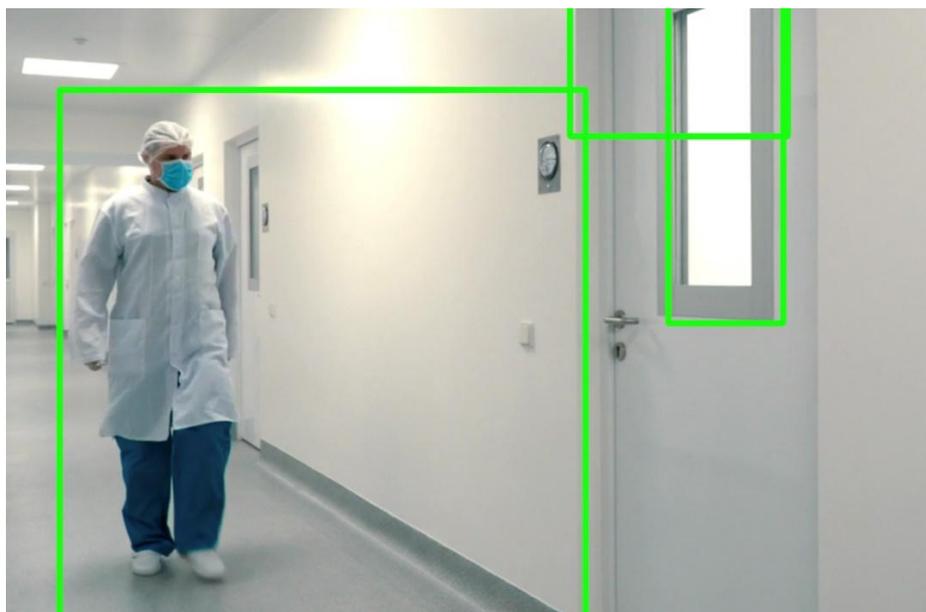


Рис. 2. Пример срабатывания алгоритма определения движения
Fig. 2. An example of the operation of the motion detection algorithm

4. Обзор существующих алгоритмов для обнаружения рабочего в специализированном костюме

Для обнаружения рабочего на видеопотоке подойдут нейронные сети, называемые детекторами. Данные архитектуры нейронных сетей позволяют определить положение объекта и обозначить искомый объект на изображении. Существует два типа детекторов: одностадийные и многостадийные.

Одностадийные детекторы, такие как SSD (Single Shot Detector) [8] и YOLO (You Only Look Once) [9], проходят по изображению с помощью алгоритма скользящего окна только один раз и строят карты признаков, после чего проводят манипуляции над полученными картами признаков и получают координаты объектов. Эти детекторы работают быстрее, чем многостадийные детекторы, но могут иметь более низкую точность. Они были разработаны для ускорения процесса обработки изображений, что делает их идеальным выбором для приложений, где скорость является ключевым фактором. Одностадийные детекторы могут быть использованы во многих приложениях, таких как системы безопасности, отслеживание объектов, автомобильная безопасность, робототехника и медицинские приложения.

Многостадийные детекторы, такие как Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) [10] и Mask R-CNN [11], работают медленнее, но могут иметь более высокую точность. Эти архитектуры проходят несколько раз по изображению с помощью метода скользящего окна, что позволяет более точно определять координаты объектов. Многостадийные детекторы используют метод обнаружения объектов, который разбивает изображение на более мелкие регионы и

применяет нейронную сеть к каждому региону, что дает более точный результат. Они могут быть использованы в задачах, где точность является ключевым фактором, таких как медицинские приложения, автомобильная безопасность и робототехника.

Кроме того, после того как детектор найдет объект на изображении, есть возможность выделить эту область и подать на вход классификатора, который определит, к какому типу объекта относится данный участок. Во многих случаях детекторы содержат в себе классификатор, который после первичной обработки определяет тип найденного объекта.

4.1. Выбор алгоритма для обнаружения рабочего в специализированном костюме

Для рассматриваемой системы более подходящим алгоритмом детектирования является одностадийный детектор. В нашей реализации мы использовали архитектуру YOLOv5, так как на момент разработки описываемой системы архитектура являлась передовой среди одностадийных детекторов. Данный подход позволяет в реальном времени обрабатывать кадры видеопотока с высокой скоростью и, помимо этого, сократить потребление ресурсов процессора, что позволит запускать систему не на специализированных серверах для работы с нейронными сетями, а на персональном компьютере.

Рассмотрим топологию архитектуры YOLOv5, которая состоит из Backbone, Neck и Head [12]. Топология архитектуры YOLOv5 изображена на рис. 3 (ист. https://img-blog.csdnimg.cn/20210425231450612.png?x-oss-process=image/watermark,type_ZmFuZ3poZW5naGVpdGk,shadow_10,text_aHR0cHM6Ly9ibG9nLmNzZG4ubmV0L1ExdTFORw==,size_16,color_FFFFFFFF,t_70).

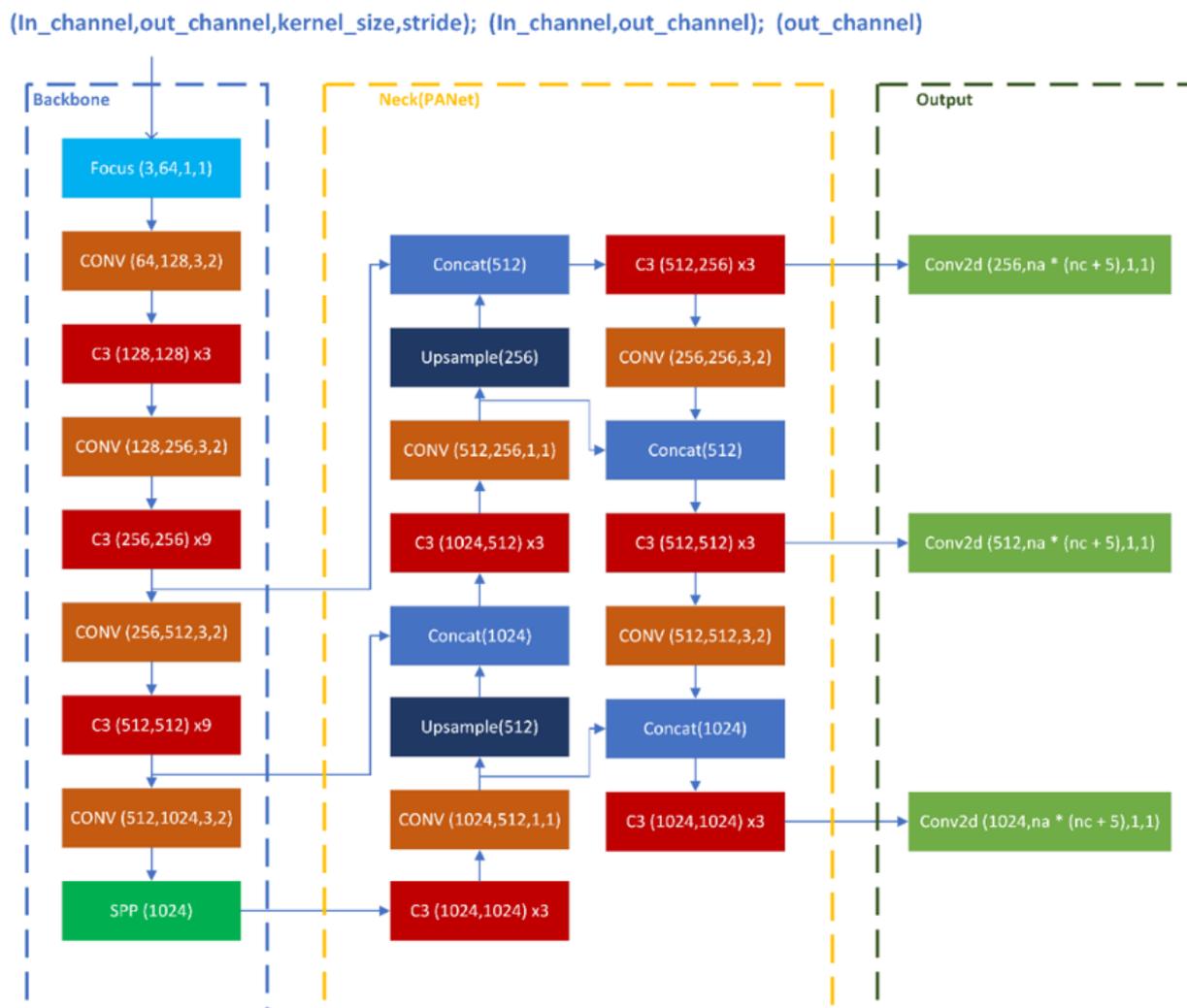


Рис. 3. Топология архитектуры YOLOv5
Fig. 3. Topology of the YOLOv5 architecture

4.1.1. Backbone

Backbone – это основная часть нейросети, отвечающая за выделение признаков из изображений и формирование информативных карт признаков, на основе которых дальнейшие слои сети осуществляют классификацию, регрессию или обнаружение объектов. Слой Backbone в YOLOv5 состоит из серии сверточных слоев [13], которые обрабатывают входное изображение и извлекают из него информацию о признаках объектов. Эта информация затем передается в дальнейшие слои сети для обработки.

4.1.2. Neck

Слой Neck использует признаки, полученные от компонента обнаружения объектов Backbone, для создания трех карт признаков разных размеров с использованием нейронной сети, которая имеет архитектуру PAN (Pyramid Attention Network) [14] и изображена на рис. 4 (ист. <https://img2018.cnblogs.com/blog/1439008/201811/1439008-20181128115656046-1491818320.png>).

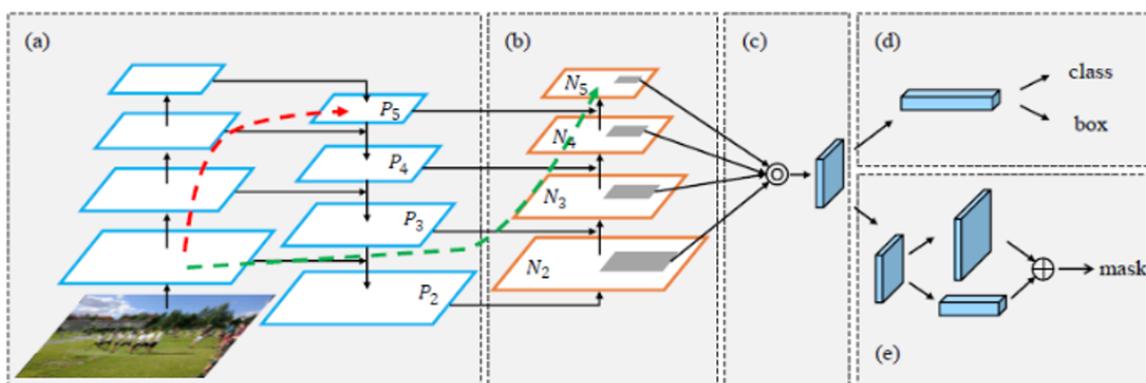


Рис. 4. Архитектура PAN
Fig. 4. PAN architecture

4.1.3. Head

Head используется для определения и классификации объектов, используя карты признаков, полученные от Backbone. Эта часть модели имеет три выхода, каждый из которых заканчивается сверточными и полносвязными слоями. Для устранения множественного определения одного и того же объекта применяется алгоритм Non-maximum suppression (NMS) [15].

На рис. 5 (ист. <https://burst.shopify.com/photos/construction-workers-meeting?q=workers+in+reflective+vests>) изображен пример определения рабочего в специализированном костюме.



Рис. 5. Пример определения рабочего в специализированном костюме
Fig. 5. An example of detecting a worker in special clothing

5. Разработка алгоритма обрезки видео при срабатывании модели

При ближайшем рассмотрении задачи возникла необходимость иметь перед событием несколько кадров, которые могли бы дать человеку, который просматривает сохраненные видеозаписи, контекст происходящего. Следовательно, необходима реализация механизма буферизации нескольких кадров и их хранения, чтобы в дальнейшем дописать эти кадры к видео с событием. Также события, между которыми прошел небольшой фиксированный промежуток времени, необходимо объединять между собой в одно большое событие. Для этого необходимо реализовать механизм сохранения кадров из промежутка.

Модуль записи видео содержит в себе два буфера: буфер, который хранит кадры с несколькими секундами перед началом события, реализованный по принципу first in – first out и имеющий ограниченную размерность, и буфер, который хранит кадры с несколькими секундами после окончания события.

Рассмотрим алгоритм для обрезки видео из видеопотока.

1. Модуль обработки кадров должен передавать обработанный кадр в модуль записи видео.
2. Если пришел новый кадр, на котором обработчик определил событие, необходимо записать кадры из первого буфера сразу в видеофайл, чтобы не держать эти кадры в оперативной памяти устройства.
3. После этого кадр, на котором было определено событие, также добавляется в видеофайл.
4. Если пришел новый кадр, на котором не было идентифицировано событие, необходимо еще какое-то время накапливать кадры без события во втором буфере, чтобы в случае начала нового события через небольшой промежуток времени после предыдущего объединить все кадры в одно видео.
5. В случае начала нового события в момент, когда второй буфер еще не переполнен, кадры из буфера необходимо также записать в видеофайл.
6. Если второй буфер переполнился, считается, что запись видеофайла нужно остановить и ожидать следующего появления кадра с событием. В это время все кадры, на которых не было идентифицировано событие, добавляются в первый буфер.

Заключение

В настоящее время автоматизация производственных процессов является одним из основных трендов в промышленности. Компании стремятся оптимизировать свою работу, чтобы повысить эффективность производства, снизить затраты на оплату труда и сократить количество ошибок, возникших из-за человеческого фактора. Реализация системы слежения за перемещением рабочих на производстве считается одним из ключевых шагов в этом направлении. Система слежения за перемещением рабочих на производстве помогает оптимизировать рабочие процессы, выявлять уязвимости и проводить оценку полезного времени рабочих в течение рабочего дня. Круглосуточное слежение за процессами, происходящими на производстве, требует финансовых затрат на обеспечение рабочих, наблюдающих за процессом через видеокамеры, а также временных затрат, связанных с ежедневным просмотром большого количества накопившегося видеоматериала и его хранения.

В ходе данной статьи была рассмотрена одна из возможных архитектур системы, целью которой является определение перемещения рабочих на производстве. Были рассмотрены модули, необходимые для применения технологии ML в системе контроля рабочего процесса, позволяющие обрабатывать видеопоток, выявлять события с движениями рабочих и сохранять их. Предложенный вариант архитектуры системы не единственный, но помогает распределить задачи для разных модулей в понятном порядке.

Для модуля обработки кадров была рассмотрена архитектура нейронной сети, которая может использоваться для обнаружения перемещения рабочих в специализированной одежде, а также алгоритм обнаружения движения в помещении.

Список литературы/References

1. Raptopoulos A., Yioultis T., Dimitriou A.G. Particle Filter Object Tracking by a Handheld UHF RFID Reader. In: *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. Pisa, Italy; 2019. P. 342–347. DOI: 10.1109/RFID-TA.2019.8892060
2. Yefymenko O., Pluhina T., Yefymenko P. Features of testing bulldozer control system with a GPS intensifier. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2022;3.
3. Agha M., Augustine B., Lovich J. et al. Using motion-sensor camera technology to infer seasonal activity and thermal niche of the desert tortoise (*Gopherus agassizii*). *Journal of Thermal Biology*. 2015;49–50:119–126. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2015.02.009
4. OpenCV. Available at: <https://opencv.org/> (accessed 19.02.2023).
5. Bergstrom A., Conran D., Messinger D. Gaussian Blur and Relative Edge Response. *Electrical Engineering and Systems Science*. 2023;1. DOI: 10.48550/arXiv.2301.00856
6. Rajapakse J.C., Giedd J.N., Rapoport J.L. Statistical approach to segmentation of single-channel cerebral MR images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1997;16(2):176–186. DOI: 10.1109/42.563663
7. Vinokurov I.V. Using a convolutional neural network to recognize text elements in poor quality scanned images. *Program Systems: Theory and Applications*. 2022;13(3):45–59. DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-3-29-43
8. Vatesia A., Faurina R., Vivin R., Indra A. Automatic Fish Identification Using Single Shot Detector. *Communication and Information Technology Journal*. 2022;16(2):167–174. DOI: 10.21512/commit.v16i2.8126
9. Wei Bai, Jingyi Zhao, Chenxu Dai et al. Two Novel Models for Traffic Sign Detection Based on YOLOv5s. *Axioms*. 2023;12(2):160. DOI: 10.3390/axioms12020160
10. Jianjing An, Dezheng Zhang, Ke Xu, Dong Wang. An OpenCL-Based FPGA Accelerator for Faster R-CNN. *Entropy*. 2022;24(10):1346. DOI: 10.3390/e24101346
11. Sahin M.E., Ulutas H., Yuce E., Erkoç M.F. Detection and classification of COVID-19 by using faster R-CNN and mask R-CNN on CT images. *Neural Computing and Applications*. March 2023. DOI: 10.1007/s00521-023-08450-y
12. Snegireva D., Perkova A. Traffic Sign Recognition Application Using Yolov5 Architecture. In: *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, Russian Federation; 2021. P. 1002–1007. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537355
13. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с. [Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Transl. from Engl. Moscow: DMK Press; 2018. 652 p.]
14. Zhou M., Huang J., Fang Y., Fu X., Liu A. Pan-sharpening with customized transformer and invertible neural network. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2022;36(3):3553–3561. DOI: 10.1609/aaai.v36i3.20267
15. Guo C., Cai M., Ying N. et al. ANMS: attention-based non-maximum suppression. *Multimedia Tools and Applications*. 2022;81(1):1–15. DOI: 10.1007/s11042-022-12142-5

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@yus.ru.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, руководитель, Индивидуальный предприниматель Шинкарев А.А., Челябинск, Россия; sania.kill@mail.ru.

Коваль Максим Евгеньевич, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kovalmax06@gmail.com.

Ядрышников Мария Викторовна, магистрант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; reeyardma@gmail.com.

Стародубцев Дмитрий Владимирович, магистрант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; starodubtcdev.d.v@gmail.com.

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; loginovskiiiov@susu.ru.

Aleksandr A. Shinkarev, Cand. Sci. (Eng.), Head, Sole Proprietor Shinkarev A.A., Chelyabinsk, Russia; sania.kill@mail.ru.

Maksim E. Koval, Postgraduate Student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kovalmax06@gmail.com.

Maria V. Yadryshnikova, Master's Student of the Department of System Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; reeyardma@gmail.com.

Dmitriy V. Starodubtcev, Master's Student of the Department of System Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; starodubtcev.d.v@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023

The article was submitted 28.02.2023

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

Научная статья
УДК 69.003
DOI: 10.14529/ctcr230204

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА РИСКОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru
С.И. Моисеев, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>
Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Учет возможных рисков, влияющих на успешную реализацию проектов в сфере строительства, является одной из важнейших задач планирования и управления строительством. Основной проблемой для учета рисков является то, что они возникают под влиянием случайных факторов в условиях высокой неопределенности. Поэтому подавляющее большинство методов учета рисков в строительстве основываются на вероятностных моделях. Учитывая то, что в последнее время уровень неопределенности практически во всех сферах хозяйственной деятельности значительно вырос, требуется разработка новых подходов к анализу рисков, которые бы максимально точно и быстро реагировали на возникающие угрозы. **Цель исследования** заключается в разработке математической модели, основанной на теории случайных марковских процессов, позволяющей в вероятностном подходе анализировать негативное влияние неблагоприятных факторов на реализацию строительных проектов в динамике их поступления в условиях высокой неопределенности с целью повышения эффективности выполнения строительных работ. **Материалы и методы.** В основе приведенной в работе модели оценки риска влияния неблагоприятных факторов на строительный проект лежит теория марковских случайных процессов, позволяющая оценить вероятность реализации возможных угроз с разной степенью ущерба, рассчитать риски при выполнении строительных работ. Модель предполагает, что угрозы, несущие разный уровень ущерба строительному проекту, поступают в случайные моменты времени и требуют разное время для их ликвидации. Для реализации модели приведена система дифференциальных уравнений, которая решается численными методами. Проведен анализ решения в различных условиях поступления угроз. Отдельно рассмотрено влияние негативных факторов на строительный проект при длительной его реализации. Проведен анализ влияния временных и вероятностных параметров задачи на степень рисков при реализации строительных проектов. **Результаты.** Показана актуальность разработки модели оценки рисков при реализации строительных проектов, поставлены цели и задачи к научному исследованию. Приведены и обоснованы пути решения поставленных задач. Разработана математическая модель, позволяющая оценить вероятности нахождения строительного проекта в различных состояниях, различающихся разной степенью риска при реализации проекта. На основе численных методов, приведена практическая реализация модели при различных параметрах, характеризующих влияние негативных факторов на ход реализации строительного проекта. Проанализированы результаты практической реализации модели, даны рекомендации по использованию модели на практике. **Заключение.** Приведенная динамическая модель оценки риска при реализации строительных проектов может служить основой для построения системы оптимального управления ходом выполнения строительных работ и принятию решений по организации строительных мероприятий.

Ключевые слова: управление строительством, риски, реализация строительных проектов, негативные факторы, математическое моделирование, марковские случайные процессы

Для цитирования: Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Динамическая модель анализа рисков при реализации строительных проектов на основе марковских случайных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 40–51. DOI: 10.14529/ctcr230204

RISK ANALYSIS DYNAMIC MODEL IN THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION PROJECTS BASED ON MARKOV RANDOM PROCESSES

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru

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

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

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Accounting for possible risks that affect the successful implementation of construction projects is one of the most important tasks in planning and managing construction. The main problem for risk accounting is that they arise under the influence of random factors under conditions of high uncertainty. Therefore, the vast majority of risk accounting methods in construction are based on probabilistic models. Given the fact that recently the level of uncertainty in almost all areas of economic activity has increased significantly, it is necessary to develop new approaches to risk analysis that would respond as accurately and quickly as possible to emerging threats. **Aim.** The purpose of the study is to develop a mathematical model based on the theory of random Markov processes, which allows, in a probabilistic approach, to analyze the negative impact of adverse factors on the implementation of construction projects in the dynamics of their receipt under conditions of high uncertainty in order to increase the efficiency of construction work. **Materials and methods.** The risk assessment model of the influence of unfavorable factors on a construction project, presented in the paper, is based on the theory of Markov random processes, which makes it possible to assess the probability of the implementation of possible threats with varying degrees of damage, and to calculate risks during construction work. The model assumes that threats that cause different levels of damage to a construction project arrive at random times and require different times to eliminate them. To implement the model, a system of differential equations is given, which is solved by numerical methods. An analysis of the solution under various conditions of threats is carried out. The influence of negative factors on the construction project during its long-term implementation is considered separately. The analysis of the influence of temporal and probabilistic parameters of the task on the degree of risks in the implementation of construction projects was carried out. **Results.** The relevance of developing a risk assessment model for the implementation of construction projects is shown, goals and objectives for scientific research are set. The ways of solving the set tasks are given and substantiated. A mathematical model has been developed that makes it possible to estimate the probabilities of finding a construction project in various states, differing in different degrees of risk during the implementation of the project. On the basis of numerical methods, the practical implementation of the model is given for various parameters characterizing the influence of negative factors on the progress of the construction project. The results of the practical implementation of the model are analyzed, recommendations are given for using the model in practice. **Conclusion.** The presented dynamic risk assessment model for the implementation of construction projects can serve as the basis for building an optimal control system for the progress of construction work and making decisions on the organization of construction activities.

Keywords: construction management, risks, implementation of construction projects, negative factors, mathematical modeling, Markov random processes

For citation: Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Risk analysis dynamic model in the implementation of construction projects based on Markov random processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):40–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230204

Введение

Одним из важнейших и актуальных направлений успешной реализации строительных проектов является учет и, как следствие, снижение организационно-технологических рисков в строительной сфере. Проявляются организационно-технологические риски на всех стадиях реализации строительных проектов, начиная от проектирования и заканчивая реализацией произведенной продукции строительства. Процесс реализации строительных проектов, комплексов работ или меро-

приятий в современных условиях невозможно представить без анализа и оценки рисков при их выполнении, который проводится на основании разнообразных методов, моделей и подходов [1–3].

Учет рисков в строительной сфере основывается на трех базовых аспектах, которые лежат в основе успешного завершения строительных проектов [4]:

- временной аспект, результатом выполнения которого является завершение строительных проектов в заданные сроки;
- стоимостной аспект, который подразумевает то, что реальная стоимость реализации строительного проекта не будет превышать заранее определенной сметы;
- качественный аспект, который предполагает, что качество строительного объекта будет не ниже допустимых пределов.

В контексте данных аспектов и учитывают потенциальные риски при реализации строительных проектов. Соответственно, в зависимости от направленности воздействия рисков зависит и возможный ущерб от наступления негативных ситуаций.

Основной проблемой для их учета является то, что риски возникают под влиянием случайных факторов в условиях высокой неопределенности [5, 6]. Поэтому подавляющее большинство методов учета рисков в строительстве основываются на вероятностных моделях. Учитывая то, что в последнее время уровень неопределенности практически во всех сферах хозяйственной деятельности значительно вырос, требуется разработка новых подходов к анализу рисков, которые бы максимально точно и быстро реагировали на возникающие угрозы.

Таким образом, направление научных исследований, связанное с разработкой новых и усовершенствованием имеющихся подходов к учету рисков в строительной сфере, является актуальным и практически востребованным в настоящее время.

Целью данной работы является разработка математической модели учета негативного влияния неблагоприятных факторов на реализацию строительных проектов в динамике их поступления в условиях высокой неопределенности. Математическая модель основана на теории марковских случайных процессов. Сначала приведем предпосылки ее использования для анализа рисков в сфере строительства.

Предпосылки использования теории случайных процессов при анализе рисков в строительстве

Как было сказано ранее, при проведении строительных работ свойственна ситуация, когда условия их проведения меняются быстро и непредсказуемо, развитие событий носят вероятностный характер и предсказать точно влияние внешних условий на результат реализации строительного проекта оказывается невозможно. Моделирование процесса реализации строительных работ с течением времени в таких ситуациях возможно только в вероятностном подходе и модель должна основываться на стохастических методах.

Для динамического моделирования процесса реализации строительных работ и проектов, в том числе с учетом возможного риска от воздействия негативных факторов, рационально использовать математические методы моделирования, основанные на теории марковских случайных процессов с непрерывным временем и дискретным состоянием [7–9].

Для применения данной модели необходимо обязательное требование, чтобы переходы между состояниями системы реализации строительных проектов, которые обозначим как S_i и S_j , осуществлялись под влиянием некоторого потока событий с интенсивностью λ_{ij} , который связан со средним временем T_{ij} нахождения системы в состоянии S_i перед переходом в состояние S_j . При этом данный поток событий должен быть потоком Пуассона [7].

Согласно [10], пуассоновские и близкие к ним по структуре потоки событий часто встречаются в задачах реализации строительных и иных проектов, на которые оказывают воздействие как позитивное, так и негативное большое число случайных внешних факторов. Учитывая это, при моделировании процессов ведения строительных работ чаще всего идет наложение (суммирование) потоков событий, связанных с влиянием внешних факторов различной природы, или их случайное разрежение, поэтому чаще всего воздействующие случайные факторы, обуславливающие эти потоки, являются независимыми. Это дает основание с высокой точностью для математического моделирования применять теорию марковских случайных процессов с дискретным состоянием для динамического описания степени риска и ущерба в вероятностном подходе [11].

При построении математической модели сделаем еще одно допущение и будем считать, что интенсивности переходных потоков событий λ_{ij} являются стационарными, то есть их параметры не зависят от времени. Если же возникнет необходимость рассматривать нестационарные потоки событий с интенсивностью, зависящей от времени $\lambda_{ij}(t)$, то на необходимом для анализа временном интервале реализации строительного проекта от t_1 до t_2 можно использовать среднюю интенсивность переходных потоков λ_{ij} , которая для этого временного интервала можно усреднить интегрированием:

$$\lambda_{ij} = \int_{t_1}^{t_2} t \cdot \lambda_{ij}(t) dt.$$

Таким образом, можно обоснованно сказать, что для построения динамической модели анализа рисков в вероятностном подходе при реализации строительных проектов и проведении комплексов работ рационально использовать теорию марковских случайных процессов с непрерывным временем и дискретным состоянием.

Математическая модель задачи

Рассмотрим некоторый строительный проект, комплекс работ или строительных мероприятий, который находится в стадии реализации. Если на данный проект не воздействуют факторы внешней среды или их воздействие незначительно и не может повлиять на изменение процесса реализации проекта в худшую сторону, то проект реализуется в соответствии с планом, вероятность его завершения в соответствии с проектной документацией считается достоверной, риски нулевые, и будем называть такой процесс реализации строительного проекта плановым.

В случайные моменты времени могут возникать некоторые обстоятельства, которые мешают нормальному процессу реализации строительного проекта и которые вызваны негативным влиянием внешней среды, риски в срыве плановой реализации проекта возрастают. Будем называть эти обстоятельства негативным влиянием или проявлением негативных факторов.

Для более точного моделирования рационально дифференцировать негативное влияние по степени его воздействия на реализацию строительного проекта.

Введем три категории негативных факторов по степени приносимого ими ущерба:

- факторы, способные принести слабый ущерб плановой реализации проекта;
- факторы, способные принести умеренный ущерб;
- факторы, способные принести значительный ущерб плановой реализации строительного проекта.

Понятно, что такое разделение негативного влияния и рисков, с ним связанных, субъективно, но всегда методами экспертного оценивания [11] при реализации конкретных строительных проектов можно отнести негативные факторы к той или иной категории.

С другой стороны, при влиянии негативных факторов система организации строительства пытается их ликвидировать или нивелировать, минимизируя ущерб и пытаясь перейти к плановой реализации строительного проекта. Мероприятия ликвидации угроз зависят от характера и объема негативных внешних воздействий, оперативной ситуации и времени, отводимого на ликвидацию угроз.

В качестве числовых характеристик, определяющих процесс поступления внешнего негативного воздействия и его ликвидации при реализации строительных проектов, определим временные параметры:

T_0 – среднее время между проявлением негативных факторов за время плановой или иной реализации строительного проекта;

T_1 – среднее время ликвидации фактора, способного принести слабый ущерб плановой реализации проекта;

T_2 – среднее время ликвидации фактора, способного принести умеренный ущерб плановой реализации проекта;

T_3 – среднее время ликвидации фактора, способного принести значительный ущерб плановой реализации проекта.

Также стоит ввести следующие вероятностные параметры:

p_1 – вероятность того, что при негативном влиянии будет причинен слабый ущерб (или, по-

другому, доля негативных факторов, способных причинить слабый ущерб плановой реализации проекта среди всего множества негативных факторов);

p_2 – вероятность того, что при негативном влиянии будет причинен умеренный ущерб;

p_3 – вероятность того, что при негативном влиянии будет причинен значительный ущерб.

Введем следующие состояния случайного процесса:

S_0 – реализация строительного проекта находится в плановом состоянии;

S_1 – на процесс реализации строительного проекта начали влиять негативные факторы, которые могут привести к слабому ущербу, проводятся мероприятия по их ликвидации;

S_2 – на строительный проект начали влиять негативные факторы, которые могут привести к умеренному ущербу, проводятся мероприятия по их ликвидации;

S_3 – на строительный проект начали влиять негативные факторы, которые могут привести к значительному ущербу, проводятся мероприятия по их ликвидации.

Переходы между состояниями случайного процесса, интенсивности переходных потоков, приводящих к смене состояний, а также особенности их получения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Переходы между состояниями случайного процесса и их характеристики

Table 1

Transitions between states of a random process and their characteristics

Переход между состояниями	Интенсивность переходного потока	Пояснения к переходу
$S_0 - S_1$	$\lambda_{01} = p_1/T_0$	При плановой реализации строительного проекта возникли негативные факторы, способные привести к слабому ущербу
$S_0 - S_2$	$\lambda_{02} = p_2/T_0$	При плановой реализации строительного проекта возникли негативные факторы, способные привести к умеренному ущербу
$S_0 - S_3$	$\lambda_{03} = p_3/T_0$	При плановой реализации строительного проекта возникли негативные факторы, способные привести к значительному ущербу
$S_1 - S_0$	$\lambda_{10} = 1/T_1$	Влияние факторов, способных привести к слабому ущербу, ликвидировано, процесс строительства вернулся к плановому режиму
$S_1 - S_2$	$\lambda_{12} = p_2/T_0$	При ликвидации негативных факторов, способных причинить слабый ущерб, произошло поступление новых негативных факторов, способных причинить умеренный ущерб, производится ликвидация негативных факторов. Если возможный ущерб при появлении новых негативных факторов ожидается слабый, то это не меняет состояния случайного процесса
$S_1 - S_3$	$\lambda_{13} = p_3/T_0$	При ликвидации негативных факторов, способных причинить слабый ущерб, произошло поступление новых негативных факторов, способных причинить значительный ущерб, производится ликвидация негативных факторов. Если возможный ущерб при влиянии новых негативных факторов ожидается слабый, то это не меняет состояния случайного процесса
$S_2 - S_0$	$\lambda_{20} = 1/T_2$	Влияние факторов, способных привести к умеренному ущербу, ликвидировано, процесс строительства вернулся к плановому режиму
$S_2 - S_3$	$\lambda_{23} = p_3/T_0$	При ликвидации негативных факторов, способных причинить умеренный ущерб, произошло поступление новых негативных факторов, способных причинить значительный ущерб, производится ликвидация негативных факторов. Если возможный ущерб при влиянии новых негативных факторов ожидается слабый или умеренный, то это не меняет состояния случайного процесса
$S_3 - S_0$	$\lambda_{30} = 1/T_3$	Влияние факторов, способных привести к значительному ущербу, ликвидировано, процесс строительства вернулся к плановому режиму

На основании данных из табл. 1 можно построить граф состояний случайного процесса, который изображен на рис. 1.

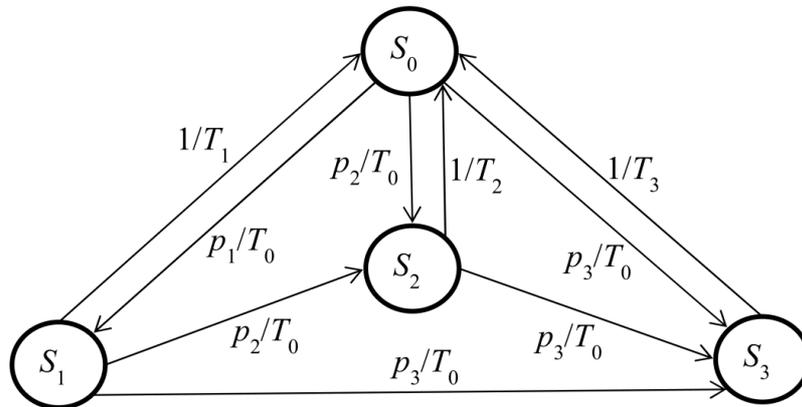


Рис. 1. Граф состояний случайного процесса
Fig. 1. Graph of states of a random process

Для описания динамики ликвидации негативных факторов с разными последствиями их влияния по модели марковских случайных процессов необходимо вычислить временные зависимости вероятностей каждого состояния: $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t)$, которые имеют смысл вероятности того, что в произвольный момент времени t случайный процесс будет находиться в состоянии S_0, S_1, S_2 либо S_3 . Вероятность исходного состояния $P_0(t)$ будет равна вероятности того, что реализация строительного проекта находится в плановом состоянии.

В соответствии с графом состояний, который изображен на рис. 1, можно построить матрицу переходных интенсивностей переходных потоков $\lambda_{ij}, i = 0, 1, 2, 3; j = 0, 1, 2, 3$, которая приведена в табл. 2.

Таблица 2
Матрица интенсивностей переходных потоков случайного процесса
Table 2
The matrix of intensities of transient flows of a random process

Состояния	S_0	S_1	S_2	S_3
S_0	0	p_1/T_0	p_2/T_0	p_3/T_0
S_1	$1/T_1$	0	p_2/T_0	p_3/T_0
S_2	$1/T_2$	0	0	p_3/T_0
S_3	$1/T_3$	0	0	0

Из рис. 1 и табл. 2 видно, что случайный процесс является эргодическим и на основании матрицы интенсивностей переходных потоков случайного процесса для нахождения вероятностей состояний составляем систему дифференциальных уравнений Колмогорова [8] вида:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \frac{P_1(t)}{T_1} + \frac{P_2(t)}{T_2} + \frac{P_3(t)}{T_3} - \frac{P_0(t)}{T_0}; \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{p_1}{T_0} P_0(t) - P_1(t) \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \frac{p_2 + p_3}{T_0} \right); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{p_2}{T_0} \cdot (P_0(t) + P_1(t)) - P_2(t) \cdot \left(\frac{1}{T_2} + \frac{p_3}{T_0} \right); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \frac{p_3}{T_0} \cdot (P_0(t) + P_1(t) + P_2(t)) - \frac{P_3(t)}{T_3}. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) содержит линейно зависимые уравнения, и для получения частного невырожденного решения можно одно из уравнений системы заменить на необходимое условие нормировки вида:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1,$$

сделаем это с последним уравнением. В итоге получим систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \frac{P_1(t)}{T_1} + \frac{P_2(t)}{T_2} + \frac{P_3(t)}{T_2} - \frac{P_0(t)}{T_0}; \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{p_1}{T_0} P_0(t) - P_1(t) \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \frac{p_2 + p_3}{T_0} \right); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{p_2}{T_0} \cdot (P_0(t) + P_1(t)) - P_2(t) \cdot \left(\frac{1}{T_2} + \frac{p_3}{T_0} \right); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Для нахождения решения системы дифференциальных уравнений (2) в численном виде используем начальные условия:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0; \quad (3)$$

которые имеют смысл того, что в начальный момент времени система находилась в состоянии S_0 .

Выражения (2) и (3) представляют собой систему линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [12, 13], которую можно решать разными методами, например, данную систему рационально решить методом собственных значений и собственных векторов [14] либо использовать численные методы с привлечением вычислительной техники.

Анализ результатов

В результате численного решения с использованием математического пакета прикладных программ Mathcad удалось найти численное решение задач (2) и (3), которое в виде графиков представлено на рис. 2. В качестве параметров задачи возьмем типичные их значения, свойственные большинству строительных проектов: $T_0 = 6$ сут, $T_1 = 2$ сут, $T_2 = 3$ сут, $T_3 = 4$ сут, $p_1 = 0,4$, $p_2 = 0,3$, $p_3 = 0,3$.

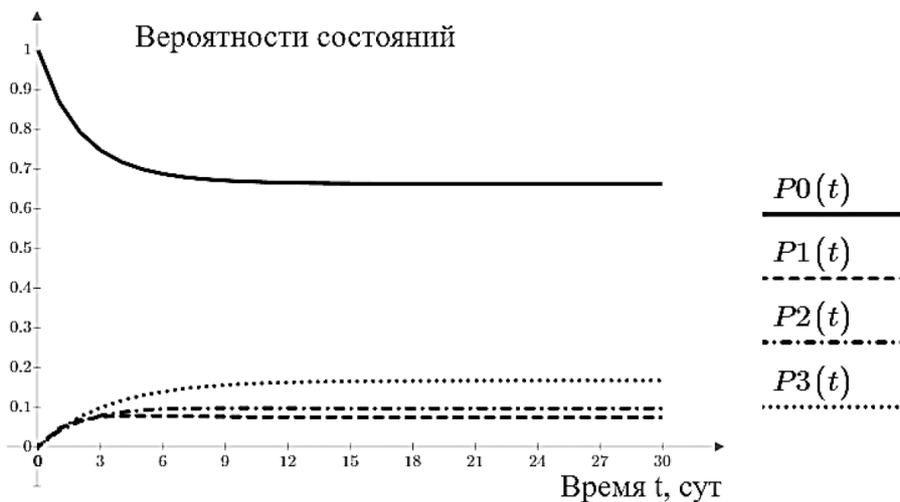


Рис. 2. Динамика изменения вероятностей состояний за 30 суток
Fig. 2. Dynamics of changes in the probabilities of states for 30 days

Здесь наиболее интересной является вероятность состояния S_0 , характеризующего нахождение строительного проекта в плановом состоянии. Из рис. 2 видно, что вероятность этого состояния убывает от начального единичного значения до значений порядка 0,7, что позволит оценивать безрисковую долю времени выполнения строительного проекта. Вероятности состояний

$P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ напротив, позволяют с течением времени оценивать риски причинения слабого, умеренного и значительного ущерба соответственно.

Также интересно рассмотреть вопрос, как вероятностные параметры p_1 , p_2 и p_3 влияют на вероятности состояний. Управлять этими параметрами можно путем анализа рискованных ситуаций, профилактическими действиями и иными мероприятиями, снижающими возможный для реализации строительных проектов ущерб.

Зависимость влияния вероятностных параметров p_1 , p_2 и p_3 на временную зависимость вероятности $P_0(t)$ представлена на рис. 3. На графиках отражены три кривые, соответствующие доминированию негативных факторов с разным уровнем ущерба. Как и ожидалось, наибольшее влияние оказывает фактор, интенсивность которого наибольшая.

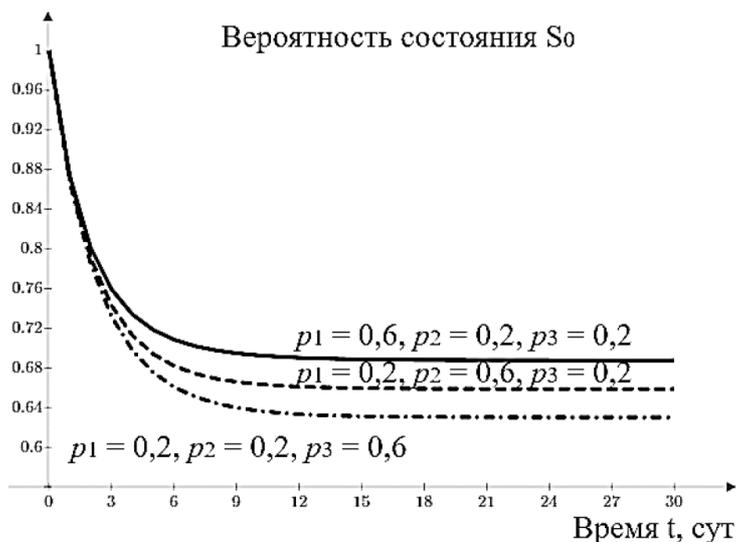


Рис. 3. Влияние вероятностных параметров на вероятность состояния S_0
Fig. 3. Influence of probabilistic parameters on the probability of the state S_0

Также рассмотрим влияние временных параметров на вероятность состояния S_0 , которое приведено на рис. 4. В качестве основного фактора возьмем среднее время нахождения строительного проекта в плановом состоянии T_0 .

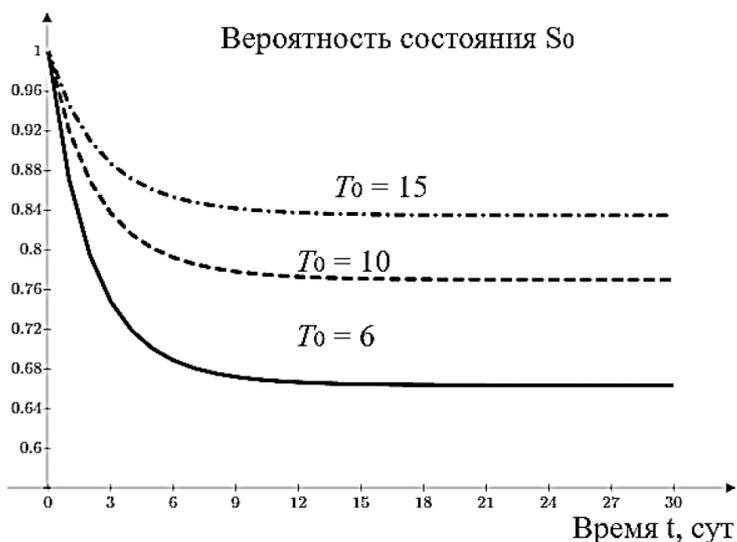


Рис. 4. Влияние временных параметров на вероятность состояния S_0
Fig. 4. Influence of time parameters on the probability of the state S_0

Графики показывают, что увеличение среднего времени нахождения строительного проекта в плановом состоянии значительно влияет на вероятность безрискового состояния, повышая его.

Анализ рисков при длительной реализации строительного проекта

Из рис. 1–4 видно, что с течением достаточно небольшого времени вероятности состояний приближаются к постоянным значениям и уже слабо зависят от времени. Это обусловлено тем, что все состояния случайного процесса являются транзитивными и сам случайный процесс является эргодическим [7]. Следовательно, с течением времени случайный процесс должен переходить в стационарный режим, когда вероятности состояний не будут зависеть от времени. Такие вероятности P_i принято называть финальными [7, 9]:

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t), \quad i = 0, 1, 2, 3.$$

Как показывают графики, изображенные на рис. 1, случайный процесс переходит в режим, близкий к стационарному уже через 10 суток после начала реализации строительного проекта.

Рассмотрим стационарный режим подробнее. Для нахождения финальных вероятностей необходимо решать систему алгебраических уравнений [7]:

$$\begin{cases} -\frac{P_0}{T_0} + \frac{P_1}{T_1} + \frac{P_2}{T_2} + \frac{P_3}{T_3} = 0; \\ \frac{P_1}{T_0} P_0 - \left(\frac{1}{T_1} + \frac{P_2 + P_3}{T_0} \right) \cdot P_1 = 0; \\ \frac{P_2}{T_0} P_0 + \frac{P_2}{T_0} P_1 - \left(\frac{1}{T_2} + \frac{P_3}{T_0} \right) \cdot P_2 = 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Можно исключить из системы (4) переменную P_3 , сократив число уравнений, а также учесть, что $p_3 = 1 - p_1 - p_2$, что позволит сократить число параметров. В итоге вместо (4) можно записать:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_3} \right) \cdot P_0 + \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right) \cdot P_1 + \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right) \cdot P_2 = \frac{1}{T_3}; \\ \frac{P_1}{T_0} P_0 - \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1 - p_1}{T_0} \right) \cdot P_1 = 0; \\ \frac{P_2}{T_0} P_0 + \frac{P_2}{T_0} P_1 - \left(\frac{1}{T_2} + \frac{1 - p_1 - p_2}{T_0} \right) \cdot P_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Систему алгебраических уравнений (5) несложно решить аналитически, такое решение будет иметь вид (для сокращения записи вновь введен параметр p_3):

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{T_0(T_0 + T_1 - p_1 T_1)(T_0 + p_3 T_2)}{(T_0 + T_1)(T_0 + T_2 - p_2 T_2)(T_0 + p_3 T_3)}; \\ P_1 &= \frac{-p_1 T_0 T_1 (T_0 + p_3 T_2)}{(T_0 + T_1)(T_0 + T_2 - p_1 T_2)(T_0 + p_3 T_3)}; \\ P_2 &= \frac{p_2 T_0 T_2}{(T_0 + T_2 - p_1 T_2)(T_0 + p_3 T_3)}; \\ P_3 &= 1 - P_0 - P_1 - P_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные аналитические зависимости (6) позволяют проводить анализ влияния параметров задачи на финальные вероятности. На рис. 5 приведена зависимость финальной вероятности P_0 , которую можно интерпретировать как среднюю долю времени, которую проводит строительный проект в плановом состоянии S_0 по истечении длительного времени.

Зависимости финальной вероятности P_0 от среднего времени ликвидации негативного воздействия разного типа показывают, что среднее время ликвидации угроз со слабым ущербом оказывает наименьшее влияние на вероятность нахождения строительного проекта в плановом состоянии при краткосрочном времени ликвидации этих угроз, а при длительном времени наименее опасными становятся негативные факторы с умеренным ущербом. Наибольшее воздействие оказывают факторы, приносящие значительный ущерб, хотя разница небольшая и зависит от вре-

менных параметров. Эти зависимости позволят оптимально распределять ресурсы при проведении профилактики влияния негативных факторов на строительный процесс.

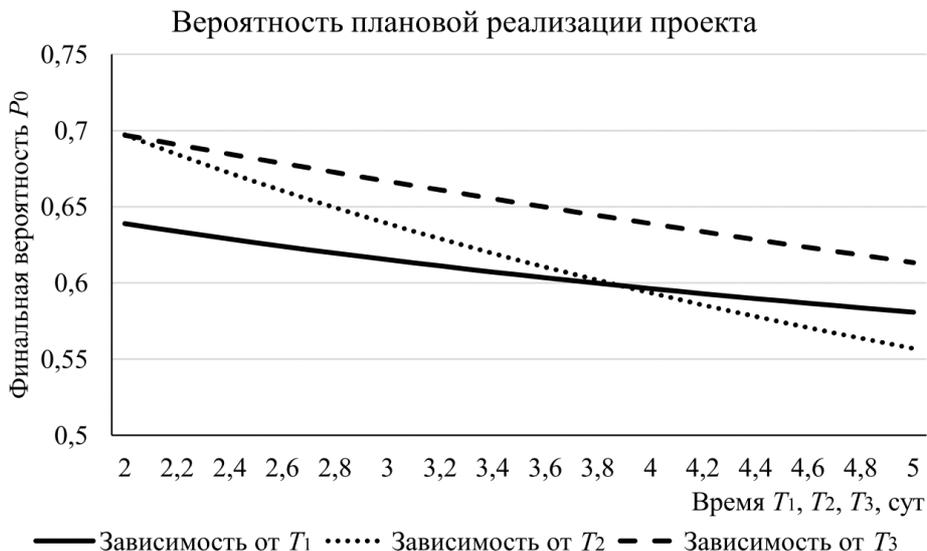


Рис. 5. Графики влияния временных параметров T_1 , T_2 и T_3 на финальную вероятность состояния S_0
Fig. 5. Graphs of the influence of time parameters T_1 , T_2 and T_3 on the final probability of the state S_0

Заключение

Таким образом, была представлена динамическая модель, позволяющая оценивать вероятности причинения ущерба той или иной степени процессу выполнения строительных проектов, комплексов работ и мероприятий в зависимости от времени. Зная вероятности $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$, характеризующие возможность влияния негативных факторов, которые могут нанести соответственно слабый, умеренный или значительный ущерб строительному проекту, а также определив через U_1 , U_2 и U_3 величину такого ущерба, можно, используя формулу для математического ожидания, определить средний ущерб $U(t)$, который может быть причинен строительному проекту в произвольный момент времени его реализации t :

$$U(t) = U_1 \cdot P_1(t) + U_2 \cdot P_2(t) + U_3 \cdot P_3(t). \tag{7}$$

Рассчитанный по формуле (7) средний ущерб принято называть риском строительного проекта [15]. На рис. 6 приведены временные зависимости риска строительных проектов для различных величин ожидаемого ущерба, которые указаны на графиках в виде весовых множителей.

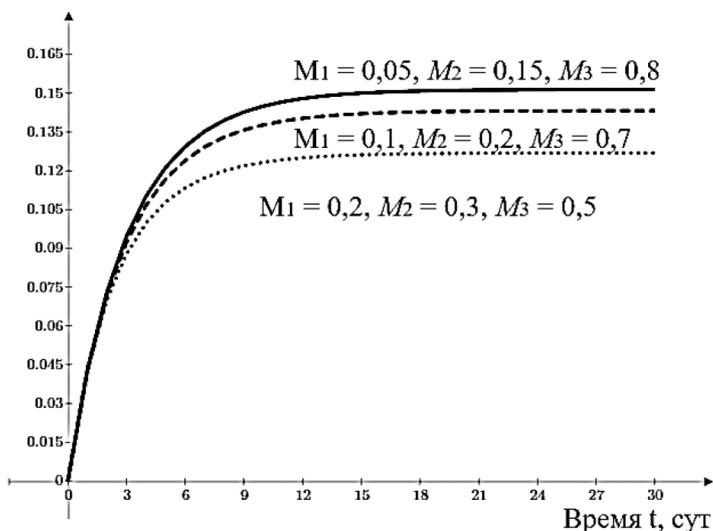


Рис. 6. Величина риска для разного распределения ущерба
Fig. 6. The magnitude of the risk for different distribution of damage

Приведенная динамическая модель оценки риска при реализации строительных проектов может служить основой для построения системы оптимального управления ходом выполнения строительных работ и принятия решений по организации строительных мероприятий.

Список литературы

1. Гладкова Ю.В., Гладков В.П. Этапы принятия управленческих решений // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2010. № 4. С. 39–44.
2. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Формирование управленческого решения на основе построения комплексных оценок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2017. № 6. С. 30–36.
3. Маликов Д.З. Этапы разработки управленческих решений // Вестник науки. 2020. Т. 4, № 5 (26). С. 116–120.
4. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for Determining the Term of Execution of Sub-conflicting Works // Proceedings of Tenth International Conference “Management of Large-scale System Development” (MLSD). 2017. P. 8109598.
5. Баркалов С.А., Глушков А.Ю., Моисеев С.И. Динамическая модель разработки и реализации проекта под влиянием внешних факторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 3. С. 76–84. DOI: 10.14529/ctcr200308
6. Гармаш А.Н., Орлова И.В. Математические методы в управлении: учеб. пособие. М.: Вузовский учебник, 2018. 240 с.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 1998. 354 с.
8. Маталыцкий М.А. Элементы теории случайных процессов: учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2004. 326 с.
9. Миллер Б.М., Панков А.Р. Теория случайных процессов в примерах и задачах. М.: Физматлит, 2002. 320 с.
10. Орлова И.В. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учеб. пособие. М.: Вузовский учебник; НИЦ Инфра-М; 2013. 389 с.
11. 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.
12. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: МЦНМО, 2012. 344 с.
13. Агафонов С.А., Герман А.Д., Муратова Т.В. Дифференциальные уравнения: учеб. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 347 с. (Математика в техническом университете. Вып. VIII).
14. Амелькин В.В. Автономные и линейные многомерные дифференциальные уравнения. М.: Издат. группа URSS, 2010. 144 с.
15. Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, В.Н. Колпачев, А.М. Потапенко. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. 87 с.

References

1. Gladkova Yu.V., Gladkov V.P. [Stages of managerial decision-making]. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*. 2010;4:39–44. (In Russ.)
2. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Formation of a management decision based on the construction integrated assessments. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2017;6:30–36. (In Russ.)
3. Malikov D.Z. [Stages of development of managerial decisions]. *Vestnik nauki*. 2020;4(5(26)):116–120. (In Russ.)
4. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for Determining the Term of Execution of Sub-conflicting Works. In: *Proceedings of Tenth International Conference “Management of Large-scale System Development” (MLSD)*; 2017. P. 8109598.
5. Barkalov S.A., Glushkov A.Yu., Moiseev S.I. Dynamic Model of Development and Implementation of the Project under the Influence of External Factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(3):76–84. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200208

6. Garmash A.N., Orlova I.V. *Matematicheskiye metody v upravlenii: uchebnoye posobiye* [Mathematical Methods in Management: Textbook]. Moscow: Vuzovskiy uchebnyk; 2018. 240 p. (In Russ.)
7. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernyye prilozheniya* [The Theory of Random Processes and its Engineering Applications]. Moscow: Vysshaya shkola; 1998. 354 p. (In Russ.)
8. Matalytsky M.A. *Elementy teorii sluchaynykh protsessov: uchebnoye posobiye* [Elements of the Theory of Random Processes: Tutorial]. Grodno: State University of Grodno Publ.; 2004. 326 p. (In Russ.)
9. Miller B.M., Pankov A.R. *Teoriya sluchaynykh protsessov v primerakh i zadachakh* [The Theory of Random Processes in Examples and Problems]. Moscow: Fizmatlit; 2002. 320 p. (In Russ.)
10. Orlova I.V. *Ekonomiko-matematicheskiye metody i modeli: komp'yuternoye modelirovaniye: uchebnoye posobiye* [Economic-Mathematical Methods and Models: Computer Modeling: Textbook]. Moscow: Vuzovskiy uchebnyk, Infra-M; 2013. 389 p. (In Russ.)
11. Barkalov S.A., Moiseev 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.)
12. Arnold V.I. *Obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya* [Ordinary Differential Equations]. Moscow: Moscow Center for Continuing Mathematical Education Publ.; 2012. 344 p. (In Russ.)
13. Agafonov S.A., German A.D., Muratova T.V. *Differentsial'nyye uravneniya: uchebnyk* [Differential Equations]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2011. 347 p. (Ser. Mathematics at the Technical University. Iss. VIII) (In Russ.)
14. Amel'kin V.V. *Avtonomnyye i lineynyye mnogomernyye differentsial'nyye uravneniya* [Autonomous and linear multidimensional differential equations]. Moscow: Editorial URSS; 2010. 144 p. (In Russ.)
15. Barkalov S.A., Burkova I.V., Kolpachev V.N., Potapenko A.M. *Modeli i metody raspredeleniya resursov v upravlenii proyektami* [Models and methods of resource allocation in project management]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2004. 87 p. (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.

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

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

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.

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.

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.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023

The article was submitted 07.03.2023

ПРИМЕНЕНИЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

И.П. Болодурина¹, ipbolodurina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>
Е.А. Спешиллов^{1,2}, evgenij.sp@mail.ru

¹ Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

² Оренбургский филиал Института экономики УрО РАН, Оренбург, Россия

Аннотация. На сегодняшний день рынок транспортного обслуживания и рынок перевозок играют ведущую роль в числе системообразующих базовых составляющих рынка транспортных услуг. Трансформация ряда производственных процессов, вызванная цифровизацией экономики, не оставила в стороне и управление логистикой. В статье рассматриваются вопросы автоматизации формирования альтернативных маршрутов посредством использования разработанного алгоритма (математическое обеспечение которого базируется на применении правил нечеткой логики), реализующего оптимизацию выбора исходя из запросов заказчика при организации грузоперевозок. Данный подход позволит фирмам не только управлять рабочими процессами в условиях риска и неопределенности, вызванных все нарастающей конкуренцией и внешними труднопредсказуемыми факторами, в том числе экономического и геополитического характера, но и проводить кастомизацию заказов, снижая при этом риски, используя методы их распределения. В статье обосновано применение данного алгоритма и представлено описание его реализации в рамках одного из модулей предлагаемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении грузопотоками. **Цель исследования** заключается в описании и апробации адаптированного к поиску маршрутов грузоперевозок математического аппарата теории нечетких множеств, позволяющего автоматизировать ряд слабо формализуемых процессов для лица принимающего решения в логистической сфере. **Материалы и методы.** На основе анализа научных идей и методологических подходов в логистике отечественных и зарубежных авторов, а также математических методов и моделей осуществлен выбор инструментария для повышения эффективности организации грузоперевозок посредством автоматизации управленческих процессов. **Результаты.** Адаптирован аппарат нечеткой логики для решения логистических задач: представлен выбор критериев, сформулированы альтернативные маршруты, описаны вычислительные эксперименты, реализованные посредством среды Yandex DataLens. Проведена корректировка модели с учетом весовых коэффициентов критериев на основе пожеланий заказчика. Представлены анализ и синтез полученных результатов, а также описаны преимущества предлагаемого подхода относительно традиционных. Функционал и интерфейс автоматизированного модуля системы протестирован с привлечением группы экспертов, заинтересованных в использовании разработки, что показало его работоспособность и эффективность применения. **Заключение.** Предлагаемый метод выбора альтернативных маршрутов может быть использован в качестве математического инструментария в основе автоматизации управления грузоперевозками в системах поддержки принятия решений, особенно при планировании деятельности малыми фирмами средствами своего автопарка.

Ключевые слова: управление грузоперевозками, интеллектуальная система поддержки принятия решений, правила нечеткой логики, алгоритм, конкурентоспособность, риск, неопределенность

Благодарности. Статья подготовлена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России для ФГБУН «Институт экономики УрО РАН».

Для цитирования: Болодурина И.П., Спешиллов Е.А. Применение правил нечеткой логики для анализа данных и принятия решений при управлении грузоперевозками в условиях неопределенности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 52–64. DOI: 10.14529/ctcr230205

APPLICATION OF FUZZY LOGIC RULES FOR DATA ANALYSIS AND DECISION-MAKING IN CARGO TRANSPORTATION MANAGEMENT UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

I.P. Bolodurina¹, ipbolodurina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>

E.A. Speshilov^{1,2}, evgenij.sp@mail.ru

¹ Orenburg State University, Orenburg, Russia

² Orenburg Branch of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

Abstract. Today, the transport services market and the transportation market play a leading role among the system-forming basic components of the transport services market. The transformation of a number of production processes, caused by the digitalization of the economy, has not left aside the management of logic. The article deals with the automation of the formation of alternative routes through the use of the developed algorithm (the mathematical support of which is based on the application of the rules of odd logic), which implements the optimization of the choice based on the customer's requests in the organization of cargo transportation. This approach will allow firms not only to manage their work processes in conditions of risk and uncertainty caused by increasing competition and external factors that are difficult to predict, including economic and geopolitical ones, but also to customize orders, while reducing risks using methods of their distribution. The article substantiates the application of this algorithm and provides a description of its implementation within one of the modules of the proposed intelligent decision support system for cargo traffic management. **The purpose of the study** is to describe and test the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets adapted to the search for cargo transportation routes, which allows automating a number of poorly formalized processes for a decision-maker in the logistics sphere. **Materials and methods.** Based on the analysis of scientific ideas and methodological approaches in logistics of domestic and foreign authors, as well as mathematical methods and models, the choice of tools for improving the efficiency of cargo transportation organization through automation of management processes was made. **Results.** The fuzzy logic apparatus has been adapted to solve logistical problems: a selection of criteria is presented, alternative routes are formulated, computational experiments implemented through the Yandex DataLens environment are described. The model was adjusted taking into account the weight coefficients of the criteria based on the customer's wishes. The analysis and synthesis of the obtained results are presented, as well as the advantages of the proposed approach, relative to the traditional ones, are described. The functionality and interface of the automated module of the system was tested with the involvement of a group of experts interested in using the development, which showed its operability and effectiveness of application. **Conclusion.** The proposed method of choosing alternative routes can be used as a mathematical tool for automating cargo transportation management in decision support systems, especially when planning activities by small firms using their own fleet.

Keywords: cargo transportation management, intelligent decision support system, fuzzy logic rules, algorithm, competitiveness, risk, uncertainty

Acknowledgments. The article was prepared in accordance with the state task of the Ministry of Education and Science of Russia for the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Bolodurina I.P., Speshilov E.A. Application of fuzzy logic rules for data analysis and decision-making in cargo transportation management under conditions of uncertainty. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):52–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230205

Введение

В настоящее время в условиях сложной геополитической ситуации, трансформации мировой экономики, подразумевающей переход на интенсивный инновационный тип развития посредством внедрения практически во все сферы деятельности цифровых технологий, Россия, как и остальные мировые державы, стремится к эффективному функционированию всего отраслевого

комплекса страны. На фоне глобальных изменений прослеживается необходимость в разработке и внедрении автоматизированных технологий обеспечения не только технологических процессов на предприятиях, но и все большее значение приобретают системы поддержки принятия решений, позволяющие руководителям, опираясь на модули сбора и обработки информации, принимать оперативные меры, направленные на повышение результативности деятельности фирм. Учитывая возникшие на сегодняшний день вопросы, связанные с санкциями и необходимостью решения проблем импортозамещения, акцент делается на разработку и внедрение отечественного программного обеспечения. По данным Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ на 1 марта 2023 г. [1] разработаны и утверждены региональные стратегии цифровой трансформации для социальной сферы и государственного управления, а также ключевых отраслей экономики, в числе которых особое внимание уделяется транспорту.

Следует отметить, что уровень развития транспорта в государстве влияет не только в целом на ВВП страны [2], но также и на ее конкурентоспособность в современных быстро меняющихся условиях, в связи с чем недооценка его значения влечет за собой серьезные негативные последствия. Так, в 2021 г. было принято распоряжение Правительства РФ об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. [3], направленной на опережающее удовлетворение ожиданий основных пользователей и потребителей транспортного комплекса, который, в свою очередь, как отмечается в документе, выполняет важные функции по достижению государственных целей в части обеспечения экономического роста и национальной безопасности страны. В числе задач выделены стимулирование внедрения инноваций и эффективных технологий перевозок, а также повышение инвестиционной привлекательности транспортной отрасли. Все это естественным образом отражается на рынке труда и делает востребованными высококвалифицированные кадры, владеющие определенным набором компетенций в сфере логистики для работы в условиях цифровизации экономики [4], приводящей к трансформации широкого круга процессов как непосредственно производственного, так и управленческого характера.

По данным Росстата [5] за период 2016–2019 гг. наблюдался рост объема грузоперевозок железнодорожным, автомобильным, трубопроводным и воздушным видами транспорта (кроме водного). Однако пандемия коронавирусной инфекции внесла коррективы, и за последние годы произошло снижение данного показателя на 17,45–22,7 %. Несмотря на общее уменьшение объема перевозок грузов, самым востребованным видом транспорта остается автомобильный. Именно с его помощью осуществляется почти 70 % всех перевозок [4]. На рынке России наиболее популярными транспортными (наряду с мувинговыми и такелажными) компаниями, занятыми грузоперевозками, являются «Деловые Линии», «СДЭК», «Почта России», «СберЛогистика». Это все достаточно крупные организации, предоставляющие определенный набор транспортных услуг по фиксированным направлениям. На сегодняшний день на фоне появления все новых и новых фирм на рынке (а также их слияния, разделения, поглощения одних другими), занятых в сфере грузоперевозок, возникает усиление уровня конкуренции. В процессе борьбы за клиента складывается система гибких цен, отказ от традиционных подходов к управлению как логистическими процессами, так и компаниями в целом [6].

Как и в любом виде деятельности, в транспортной логистике имеется свой массив проблем [7], в числе которых сложности с поиском возможностей для восстановления транспорта, выбором оптимального вида транспортного средства, организацией эффективных мультимодальных грузоперевозок, обеспечением качества предоставляемых транспортных услуг, решением вопросов страхования груза и транспорта, цифровизацией процессов управления и сопровождения грузопотоков и пр. К этому перечню можно добавить, что предприятиям, особенно тем, у кого грузоперевозки не являются основным видом экономической деятельности, содержание собственного автопарка обходится дорого, причем экономически невыгодно отправлять транспорт перегруженным или недогруженным, в связи с чем необходима разработка оптимального сочетания затрат, вида транспорта и маршрута. Что касается последнего, то его поиску следует уделять особое внимание, так как логистическая деятельность сильно зависит от ряда слабо формализуемых случайных факторов – невозможно предусмотреть все нюансы транспортировки, среди которых: плохая дорога, наличие аварий, неблагоприятные погодные условия и пр., что приводит к увеличению запланированного времени. Ко всему прочему, функционируя в конкурентной среде,

небольшим фирмам приходится уделять большое внимание вопросам клиентоориентированности, учитывая пожелания заказчика, в числе которых могут быть требования по поддержанию определенной температуры транспортируемого товара, обеспечению его доступности с учетом расположения точек для доставки и пр. [8].

Таким образом, содержание транспортного бизнеса зависит не только от количества и качества транспортных средств, но и в значительной степени от способности эффективно управлять товарными и информационными потоками, проявляя гибкость относительно предъявляемых требований с учетом временных ограничений. Кроме того, функционирование в условиях неопределенности и риска вынуждает искать несколько альтернативных вариантов для достижения конечного результата. Следует отметить, что любой уход от стандартизации и обеспечение «гибкой настройки» системы ведет к удорожанию самой услуги, но при наличии запроса необходим поиск, например, соотношения для потребителя «затраты – время», для организации – «затраты – прибыль» с целью обеспечения конкурентоспособности компании и формирования ее высоко-рейтинговой репутации.

Резюмируя все вышесказанное, можно сделать вывод, что для повышения эффективности функционирования и увеличения экономической прибыли организации постоянно вынуждены заниматься поиском новых методов и средств для привлечения клиентов, а также маршрутов для организации грузоперевозок с учетом логистических подходов к управлению грузопотоками. Поэтому актуальна необходимость разработки интеллектуальных средств поддержки принятия решений, благодаря которым возможна реализация автоматизации ряда возникающих в сфере организации грузоперевозок задач, адаптированных к запросам потребителей. Это особенно востребовано малыми компаниями, не имеющими материальной возможности на покупку дорогостоящей электронной экспертной системы, а также теми, у кого грузоперевозки не являются основным видом деятельности, но обязательны при организации производства и ведутся силами своего автопарка.

1. Описание подхода

Методологические аспекты управления логистическими системами, а также вопросы стратегического характера, рассмотренные в ряде работ [9, 10], подкрепляются различными подходами к математической формализации отдельных процессов [11–13] с учетом оптимизации [14–16], в том числе в сфере управления грузопотоками и непосредственно грузоперевозками. Рассматривая логистическую систему как организационно-управленческий комплекс, причем с эффективной обратной связью, оценка которой математически рассчитывается [17–20], следует вести разговор не только о поиске оптимального соотношения между затратами и уровнем качества предоставляемых услуг, но и о рациональном функционировании фирмы в цифровой среде [21], что достигается в том числе и посредством использования автоматизированных систем, интегрированных в процессы управления транспортом и грузоперевозками [22–24].

С учетом проведенного анализа организационно-методических аспектов, включающих формализацию и возможность автоматизации ряда логистических процессов, предлагаем использовать, разработанную нами интеллектуальную систему поддержки принятия решений для управления грузопотоками (ИСППРУГ). В ее составе предусмотрены блоки: формирования базового математического обеспечения (анализ, формализация, математическое моделирование задач и процессов управления грузопотоками) – I; маршрутизации грузопотоков (синтез автоматизированных модулей системы, в числе которых подсистемы выбора маршрута и управления непосредственно процессом грузоперевозок, в основу которой входит модуль автоматизации заполнения путевого листа) – II; оценки эффективности (в состав входят модули анализа применения как отдельных составляющих, так и расчета экономической эффективности от внедрения системы) – III.

Более подробно остановимся на втором блоке системы и в частности на подсистеме выбора маршрута (основанной на автоматизации расчетных методов нечеткой логики), позволяющей ранжировать выявленные комбинации альтернатив маршрутизации (их исходный набор формируется на основе использования Яндекс Карт и пожеланий заказчика) по преимуществу согласно сформированным критериям. При необходимости возможна расстановка для некоторых из них весовых коэффициентов по запросам клиента и организация дополнительных расчетов. Соответствующий алгоритм представлен на рисунке.



Алгоритм подсистемы выбора маршрута
Route selection subsystem algorithm

Рассмотрим элементы автоматизации реализуемых в подсистеме математических подходов.

2. Практические расчеты

В основу алгоритма, позволяющего найти наиболее приемлемый маршрут транспортировки груза, был положен метод многокритериального выбора альтернатив, основанный на применении композиционного правила агрегирования их описаний с информацией о предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), которые заданы в виде нечетких суждений [25, 26]. В процессе апробации для формирования критериев и оценки результатов расчетов были привлечены представители организаций, в трудовые функции которых входят управление грузопотоками и непосредственно организация грузоперевозок.

При рассмотрении заказчиком возможных вариантов маршрута перевозки груза ставилась задача выявления наилучшего из них. Суждения в этом случае по аналогии с [25] выглядели следующим образом:

- d_1 : «Если на маршруте хорошее дорожное покрытие, небольшая протяженность пути и небольшое количество населенных пунктов, то он – удовлетворяющий (отвечающий требованиям)»;
- d_2 : «Если на маршруте вдобавок к вышеописанным требованиям отсутствуют (или их число мало) таможенные пункты и пункты ГАИ, то он – более чем удовлетворяющий»;
- d_3 : «Если на протяжении пути дополнительно к условиям d_2 имеются скоростные магистрали, то он – безупречный»;
- d_4 : «Если маршрут имеет все оговоренное в d_3 , кроме отсутствия таможенных пунктов, то он – очень удовлетворяющий»;
- d_5 : «Если маршрут имеет хорошее дорожное покрытие, небольшое количество населенных пунктов, на нем присутствуют скоростные магистрали, но протяженность относительно других вариантов высока, он все же будет удовлетворяющим»;
- d_6 : «Если маршрут не имеет хорошего дорожного покрытия и относительно длинный, то он – неудовлетворяющий».

Анализ формулировок позволил выявить шесть критериев, используемых для принятия решения: X_1 – хорошее дорожное покрытие; X_2 – малая протяженность пути; X_3 – малое количество или отсутствие населенных пунктов; X_4 – наличие скоростных магистралей; X_5 – малое количество или отсутствие таможенных пунктов и пунктов ГАИ; Y – удовлетворительность. После определения возможных значений лингвистических переменных X_i и Y (Y задана на множестве $J = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$ с помощью функций принадлежности, аналогичных представленным в [25]) осуществлялся выбор из пяти маршрутов на множестве $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$. Оценки маршрутов были заданы следующими нечеткими множествами:

- ХОРОШЕЕ* (качество дорожного покрытия) $A = \{0,8/u_1, 0,7/u_2, 0,8/u_3, 0,4/u_4, 0,5/u_5\}$;
- МАЛАЯ* (протяженность) $B = \{0,7/u_1, 0,8/u_2, 0,4/u_3, 1/u_4, 0,9/u_5\}$;
- МАЛОЕ* (количество населенных пунктов) $C = \{0,4/u_1, 0,6/u_2, 0,7/u_3, 0,9/u_4, 0,8/u_5\}$;
- ИМЕЮТСЯ* (скоростные автомагистрали) $D = \{0,3/u_1, 0,5/u_2, 0,8/u_3, 0/u_4, 0,1/u_5\}$;
- МАЛОЕ* (количество постов ГАИ) $E = \{0,6/u_1, 0,6/u_2, 0,6/u_3, 0,9/u_4, 0,8/u_5\}$.

С учетом введенных обозначений были формализованы правила d_1, \dots, d_6 и вычислены функции принадлежности μ_M .

Для автоматизации расчетов применялся инструментарий среды Yandex DataLens. Используя вычисляемые поля специально созданного датасета, реализовали операции над полями данных по заданным формулам с возможностью пересчета при изменении входных параметров. Yandex DataLens был выбран исходя из возможности синтеза вычислительного аппарата с Яндекс Картами, используемыми при формировании альтернативного набора маршрутов.

Применяя для преобразования правил вида «Если $X = M$, то $Y = Q$ » импликацию Лукасевича $\mu_D(u, j) = \min(l, 1 - \mu_M(u) + \mu_Y(j))$, для каждой пары $(u, j) \in U \times J$ получены нечеткие отношения на $U \times J$ и в результате пересечения отношений D_1, \dots, D_6 вычислено общее функциональное решение:

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,6	0,61	0,64	0,69	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
u_2	0,4	0,41	0,44	0,49	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
$D = u_3$	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8
u_4	0,6	0,61	0,64	0,69	0,76	0,85	0,96	1	1	1	1
u_5	0,5	0,51	0,54	0,59	0,66	0,75	0,86	0,9	0,9	0,9	0,9

Для расчета удовлетворительности каждой из альтернатив использовано правило композиционного вывода в нечеткой среде $E_k = G_k \circ D$ (где E_k – степень удовлетворения альтернативы k ; G_k – отображение альтернативы k в виде нечеткого подмножества на U ; D – общее функциональное решение). Тогда

$$\mu_{E_k}(i) = \max \left(\min \left(\mu_{G_k}(u), \mu_D(u) \right) \right).$$

Вычисляя уровневые множества $E_{j\alpha}$ и их мощность $M(E_{j\alpha})$, нашли точечные оценки всех альтернатив:

$$F(E_1) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(E_{j\alpha}) d\alpha =$$

$$= \frac{1}{0,8} \cdot 0,5 \cdot 0,6 + 0,55 \cdot 0,01 + 0,6 \cdot 0,03 + 0,65 \cdot 0,05 + 0,7 \cdot 0,01 + 1 \cdot 0,1 = 0,57875.$$

Аналогично $F(E_2) = 0,70375$; $F(E_3) = 0,64375$; $F(E_4) = 0,5945$; $F(E_5) = 0,5445$.

3. Анализ результатов и их корректировка

Согласно [25] в качестве лучшей выбирается альтернатива, имеющая наибольшую точечную оценку. В нашем случае это u_2 , следовательно, она и будет наилучшей. На втором месте u_3 , на третьем – u_4 , на четвертом – u_1 , а самой худшей оказалась альтернатива u_5 .

Однако следует отметить, что формализация знаний с помощью правил нечеткой логики позволяет еще и учитывать различную важность критериев и самих правил [25]. Предположив, что в рассмотренной задаче ЛПР считает крайне важным наличие на пути движения скоростных автомагистралей, в правилах d_2 и d_3 значением критерия X_4 становится понятие ДОСТАТОЧНО МНОГО, описываемое нечетким множеством D_1 следующего вида:

$$\mu_{D_1}(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_D(u) = 1 \\ 0, & \text{если } \mu_D(u) < 1 \end{cases} \quad x \in J.$$

Правило d_4 в этом случае было исключено из рассмотрения, так как теперь маршрут, на котором нет скоростных магистралей, не является ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИМ. Тогда соответствующие левым частям правил нечеткие множества M_i , $i = 1, \dots, 6$, $i \neq 4$, стали иметь вид:

$$\mu_{M_1}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u));$$

$$M_1 = \{0,4/u_1, 0,6/u_2, 0,4/u_3, 0,4/u_4, 0,5/u_5\};$$

$$\mu_{M_2}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u), \mu_D(u));$$

$$M_2 = \{0/u_1, 0/u_2, 0,4/u_3, 0/u_4, 0/u_5\};$$

$$\mu_{M_3}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u), \mu_D(u), \mu_E(u));$$

$$M_3 = \{0/u_1, 0/u_2, 0,4/u_3, 0/u_4, 0/u_5\};$$

$$\mu_{M_5}(u) = \min(\mu_A(u), 1 - \mu_B(u), \mu_C(u), \mu_E(u));$$

$$M_5 = \{0/u_1, 0/u_2, 0,6/u_3, 0/u_4, 0/u_5\};$$

Для d_6 : $\mu_{M_6}(u) = \min(1 - \mu_A(u), 1 - \mu_C(u));$

$$M_6 = \{0,2/u_1, 0,2/u_2, 0,2/u_3, 0/u_4, 0,1/u_5\}.$$

Опуская промежуточные вычисления, автоматически также реализованные в среде Yandex DataLens, приведем новое полученное функциональное решение D^* и соответствующие ему точечные оценки для альтернатив:

		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$D^* = u_3$	u_1	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1	1	1	1	0,9	0,8
	u_2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1	1	0,9	0,8
	u_3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8
	u_4	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1	1	1	1	1	1
	u_5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1	1	1	1	0,9

$$F^*(u_1) = 0,535; F^*(u_2) = 0,59; F^*(u_3) = 0,64375;$$

$$F^*(u_4) = 0,55; F^*(u_5) = 0,57.$$

Сравнение полученных результатов показало, что с повышением значимости критерия X_4 ранжировка альтернатив несколько изменилась: u_3 и u_2 поменялись местами, и теперь именно u_3

явилась наилучшей. Этот факт согласуется с исходными данными, так как u_3 имеет максимальное значение по критерию X_4 , а u_2 – не достаточно большое.

Для учета различной важности правил можно использовать нормированные весовые коэффициенты, получаемые одним из двух способов: попарным сравнением или экспертным назначением весов [25]. Таким образом, описанный подход позволяет учесть индивидуальные пожелания заказчика, присваивая те или иные веса альтернативам. Причем данная процедура может быть реализована как на начальном этапе выбора маршрута, так и в процессе оперативного управления грузоперевозками с учетом вновь появившихся не учтенных ранее факторов внешней среды (аварии, перекрытые дороги и пр.) или, например, изменившихся условий в силу возникших технических ограничений эксплуатации транспорта или временного нарушения графика.

4. Экспертная оценка разработки

Нами реализована экспертная оценка эффективности применения предлагаемого алгоритма в рамках автоматизированного модуля подсистемы выбора маршрута ИСППРУГ. В качестве экспертов выступали руководители структурных подразделений одного из предприятий города Оренбурга, в направлениях деятельности которого обозначена в том числе и организация грузоперевозок. Для начала с целью формирования обобщенной оценки \bar{x}_{ij} каждому эксперту ($i = 1, 2, \dots, 6$) было предложено оценить предлагаемый подход ($j = 2$) относительно стандартной процедуры выбора маршрута ($j = 1$) по пятибалльной шкале. Обработка полученных результатов осуществлялась через расчет средней арифметической величины [27], в результате чего был сделан вывод, что предложенный в исследовании вариант подбора маршрута более предпочтителен:

$$\bar{x}_{31} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_{i1}}{6} < \bar{x}_{32} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_{i2}}{6}.$$

Далее экспертам было предложено оценить потенциальную эффективность самой интеллектуальной технологии в общей совокупности предлагаемых модулей (тем более внедрение программы автоматизированного заполнения путевых листов [28] также было апробировано на данном предприятии ранее). Оценка осуществлялась по формуле

$$K_3 = \sum_{j=1}^n \sum_i^m (a_{ij} b_j) / mn \rightarrow 1,$$

где K_3 – уровень эффективности разработки; $i = 1, 2, \dots, m$ – количество оцениваемых параметров; $j = 1, 2, \dots, n$ – количество экспертов; a_{ij} – оценка j -м экспертом i -го параметра по пятибалльной системе; b_i – весомость i -го параметра.

По сформулированным параметрам была установлена следующая оценочная шкала для экспертов: выражен явно – 5 баллов; хорошо выражен – 4 балла; выражен средне (не сильно и не слабо) – 3 балла; выражен слабо – 2 балла; не выражен – 1 балл. В таблице представлены промежуточные и итоговые результаты экспертной оценки.

Экспертная оценка эффективности ИСППРУГ
Expert evaluation of the effectiveness of ISPPRUG

Параметр	Оценки экспертов (a_{ij})						Весомость показателя (b_i)	$\sum_{i=1}^5 (a_{ij} b_i)$
	1	2	3	4	5	6		
1. Актуальность решаемой проблемы	4	4	3	5	4	4	0,15	3,6
2. Простота внедрения	5	5	4	4	4	4	0,25	6,5
3. Доступность необходимых данных и удобство использования	3	4	3	5	4	5	0,2	4,8
4. Степень автоматизации	4	5	4	5	5	4	0,3	8,1
5. Отсутствие необходимости дополнительного обучения	4	4	5	5	4	5	0,1	2,7
Итого в среднем	4,0	4,4	3,8	4,8	4,2	4,4	1,00	$\frac{\sum_{j=1}^6 \sum_i^5 (a_{ij} b_i)}{30} = 0,86$

В итоге уровень потенциальной эффективности системы составил 86 % из максимального значения 100 %. Это свидетельствует о высоком уровне применимости разработки.

Заключение

Главной задачей организаций, занятых в сфере транспортной логистики, является доставка грузов в место назначения с учетом временных ограничений в целостности и сохранности, причем с наименьшими финансовыми расходами. Однако, работая в условиях конкуренции с высокой степенью неопределенности и риска (связанной с особенностями как функционирования самих транспортных средств, поведения на дорогах и пр., так и с постоянно меняющимися сложными экономическими и геополитическими ситуациями), фирмы, особенно небольшие, вынуждены предоставлять услуги, подстраиваясь под требования и пожелания заказчиков. В этом случае быстрый поиск альтернативных вариантов маршрутов, основанный на предлагаемом подходе автоматизации расчетов методами нечеткой логики с возможностью предоставления окончательного выбора наиболее приемлемого из них самому потребителю (на его взгляд с учетом предполагаемых затрат, например временного и материального характеров), способствует, с одной стороны, расширению клиентской базы за счет привлечения потребителей с индивидуальными (кастомными) заказами, с другой – снижению рисков для компании, так как часть из них (что отражается в договоре) берет на себя заказчик «нестандартных» услуг.

Благодаря автоматизации реализации расчетного алгоритма можно говорить о возможности быстрой гибкой адаптации маршрутов с учетом каких-либо известных изменений или об осуществлении подбора уникальных характеристик маршрутизации исходя из запросов клиента в случае процедуры кастомизации заказа. В условиях возрастающей конкуренции фирмы вынуждены разрабатывать уникальные предложения для потребителей, при этом увеличиваются не только затраты на услуги, но и риски. Однако если есть спрос, значит, должно быть и предложение. Что же касается возрастающих рисков, то частично вызванные ими возможные дополнительные затраты могут быть учтены в стоимости услуги, а частично по условиям договора – возложены на заказчика. В этом случае выигрывают небольшие фирмы и частные перевозчики, реализующие более гибкую политику цен и набор предложений, а также имеющие возможность осуществлять перевозку по индивидуальному заказу. Предлагаемый алгоритм, реализованный посредством использования среды Yandex DataLens и не требующий дополнительного сложного обучения, позволит ЛПП принимать эффективные управленческие решения в сфере грузоперевозок как стратегического, так и оперативного характера.

Проведенная оценка эффективности для использования предлагаемого алгоритма выбора маршрута показала его преимущество относительно стандартного подхода, а для разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении грузопотоками – ее применимость на предприятиях в сфере транспортной логистики.

Список литературы

1. Стратегии цифровой трансформации [Электронный ресурс] // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: сайт. URL: https://digital.gov.ru/activity/directions/1064/?utm_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f (дата обращения: 10.03.2023).
2. Дитрих Е.И. Транспортная отрасль обеспечивает до 7 % ВВП России [Электронный ресурс]. URL: <http://vestnikstroy.ru/articles/infrastructure/evgeniy-ditrikh-transportnaya-otrasl-obespechivaet-do-7-vvp-rossii/?ysclid=le5nvi9b6p126309168> (дата обращения: 15.02.2023).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11577?ysclid=leiii1iiih656421595> (дата обращения: 24.02.2023).
4. Спешилова Н.В., Спешилов Е.А. Анализ состояния транспортной отрасли и проблемы развития логистических систем в России в условиях цифровизации // Экономика и предпринимательство. 2022. № 2 (139). С. 670–674. DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.126
5. Россия в цифрах: краткий статистический сборник. 2021 [Электронный ресурс] / Росстат. М., 2021. 257 с. URL: <http://www.online-documents.ru/report/2021/russia/12/> (дата обращения: 24.02.2023).

6. Крегель Д.А. Роль транспортной отрасли в инновационном развитии экономики // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2018. № 1. С. 6–13. DOI: 10.18384/2310-6646-2018-1-6-13
7. Щebetеева С.М., Айрапетян М.К. Роль и значение логистики в деятельности предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2015. № 4. С. 34–37.
8. Спешилова, Н.В., Спешиллов Е.А. Особенности реализации технологических инноваций при управлении грузоперевозками в цифровой экономике // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 76-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне, «Социально-экономическое развитие хозяйствующих субъектов (в том числе учреждений УИС), отраслей, регионов: проблемы и перспективы», г. Рязань, 30 апреля 2021 г. Рязань, 2021. С. 207–212.
9. Сток Дж.Р., Ламберт Д.М. Стратегическое управление логистикой: пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 2005. 797 с.
10. Тарасенко Е.А., Карх Д.А., Тяпухин А.П. Управление логистическими системами: моногр. М.: ООО «Издательство «КноРус», 2021. 156 с.
11. Панюков А.В., Пивоварова Ю.В., Чалуб Х.З. Математическая модель для решения оперативной проблемы региональных грузоперевозок // Наука ЮУрГУ: материалы 70-й научной конференции. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. С. 71–76.
12. Трипкош В.А., Спешиллов Е.А. Модельное представление организации грузопотоков транспортной компании в рамках реализации логистической стратегии // Сборник материалов X Всероссийской конференции с международным участием «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. Оренбург, 2021. С. 385–389.
13. Dib O., Manier M.-A., Moalic L. Advanced modeling approach for computing multicriteria shortest paths in multimodal transportation networks // 2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Singapore, 2016. P. 40–44. DOI: 10.1109/ICITE.2016.7581304
14. Бронштейн Е.М., Зайко Т.А. Детерминированные оптимизационные задачи транспортной логистики // Автоматика и телемеханика. 2010. № 10. С. 133–147.
15. Козлов П.А., Владимирская И.П. Методы оптимизации взаимодействия железнодорожно-го и морского транспорта // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 1 (20). С. 53–55.
16. Jabir E., Panicker V.V., Sridharan R. Multi-objective optimization model for a green vehicle routing problem // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 189. P. 33–39. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.03.189
17. Панченко В.В. Рынок информации: структура и особенности // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 221, № 1. С. 164–168.
18. Юрченков В.А., Котелев С.Г. Оценка эффективности логистической системы предприятия // Сборник материалов X Международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития», Чебоксары, 21 мая 2018 г. Чебоксары: ООО «Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2018. С. 262–264.
19. Baran J., Dark J. Multiple criteria evaluation of transportation performance for selected agribusiness companies // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2013. Vol. 34, no. 6. P. 1561–1584.
20. L’och M., Dolinayova A. Evaluation quality the freight transport through application of methods multi-criteria decision // Procedia Economics and Finance. 2015. Vol. 34. P. 210–216. DOI: 10.1016/S2212-5671(15)01621-4
21. Shepel V.N., Speshilova N.V., Kitaeva M.V. Technology of Management Decision-Making at Industrial Enterprises in the Digital Economy // GCPMED 2018 – International Scientific Conference “Global Challenges and Prospects of the Modern Economic Development”, Samara, Russia, 06–08 December 2018. The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. 2019. Vol. 57. P. 1520–1531. DOI: 10.15405/epsbs.2019.03.155. URL: <https://www.futureacademy.org.uk/files/images/upload/GCPMED%202018F155.pdf>.
22. Болодурина И.П., Нугуманова А.А. Фильтр Винера как метод вторичной обработки информации с системы ГЛОНАСС // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 8. С. 79–83.
23. Курманова Е.Л. 3PL-провайдер – основа становления рынка транспортно-логистических услуг // Вестник университета. 2013. № 2. С. 61–64.

24. Панюков А.В., Пивоварова Ю.В. Развитие транспортной логистики в Челябинской области: проблемы и перспективы применения информационных технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2017. Т. 11, № 1. С. 7–11. DOI: 10.14529/em170101
25. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
26. Ojha, A., Mondal M.K., Maiti M. Transportation policies for single and multi-objective transportation problem using fuzzy logic // Mathematical and Computer Modelling. 2011. Vol. 53, iss. 9–10. P. 1637–1646. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.12.029
27. Данелян Т.Я. Формальные методы экспертных оценок // Экономика, Статистика и Информатика. 2015. № 1. С. 183–187.
28. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021660670. Путевой лист / В.Н. Шепель, Р.Р. Рахматуллин, В.А. Трипкош, Е.А. Спешилов. Роспатент, 30.06.2021.

References

1. *Strategii tsifrovoy transformatsii* [Digital transformation strategies] [Electronic resource]. *Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation: website* (In Russ.) Available at: http://digital.gov.ru/ru/activity/directions/1064/?utm_referrer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f (accessed 10 March 2023).
2. Ditrikh E.I. *Transportnaya otrasl' obespechivayet do 7 % VVP Rossii* [The transport industry provides up to 7% of Russia's GDP] [Electronic resource]. (In Russ.) Available at: <http://vestnikstroy.ru/articles/infrastructure/evgeniy-ditrikh-transportnaya-otrasl-obespechivaet-do-7-vvp-rossii/?ysclid=le5nvi9b6p126309168> (accessed 15 February 2023).
3. *Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 goda № 3363-r "Ob utverzhenii Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda"* [Decree of the Government of the Russian Federation № 3363-r dated November 27, 2021 "On approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035"] [Electronic resource]. (In Russ.) Available at: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11577?ysclid=leiii1iiih656421595> (accessed 24 February 2023).
4. Speshilova N.V., Speshilov E.A. Analysis of the state of the transport complex and problems of development of logistics systems in Russia under the conditions of digitalization. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2022;2(139):670–674. (In Russ.) DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.126
5. *Rossiya v tsifrakh: kratkiy statisticheskiy sbornik. 2021* [Russia in numbers: a brief statistical collection. 2021] [Electronic resource]. Rosstat. Moscow; 2021. 257 p. (In Russ.) Available at: <http://www.online-documents.ru/report/2021/russia/12/> (accessed 24 February 2023).
6. Kregel D.A. The role of transport industry in innovative development of economy. *Bulletin of Moscow state regional university. Series: Economics*. 2018;1:6–13. DOI: 10.18384/2310-6646-2018-1-6-13
7. Shchebeteeva S.M., Hayrapetyan M.K. The role and importance of logistics in the enterprise. *Economy and business: theory and practice*. 2015;4:34–37.
8. Speshilova, N.V., Speshilov E.A. [Features of the implementation of technological innovations in cargo transportation management in the digital economy]. In: *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 76-y godovshchine Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne "Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie khozyaystvuyushchikh sub"ektov (v tom chisle uchrezhdeniy UIS), otrasley, regionov: problemy i perspektivy"*, g. Ryazan', 30 aprelya 2021 g. [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 76th anniversary of Victory in the Great Patriotic War "Socio-economic development of economic entities (including UIS institutions), industries, regions: problems and prospects", Ryazan, April 30. 2021]. Ryazan', 2021. P. 207–212. (In Russ.)
9. Stock J.R., Lambert D.M. *Strategic Logistics Management*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2001. 872 p. ISBN 0256136874
10. Tarasenko E.A., Karkh D.A., Tyapukhin A.P. *Upravlenie logisticheskimi sistemami: monografiya* [Logistics systems management: monograph]. Moscow: LLC "KnoRus Publishing House"; 2021. 156 p. (In Russ.)
11. Panyukov A.V., Pivovarova Yu.V., Chalub Kh.Z. [A mathematical model for solving the operational problem of regional cargo transportation]. In: *Nauka YuUrGU: materialy 70-y nauchnoy*

konferentsii [SUSU Science: Proceedings of the 70th Scientific Conference]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2018. P. 71–76. (In Russ.)

12. Tripkosh V.A., Speshilov E.A. [Model representation of the organization of cargo flows of a transport company within the framework of the implementation of the logistics strategy]. In: *Sbornik materialov X vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tehnologii"*, Orenburg, 18–19 noyabrya 2021 goda [Collection of materials of the X All-Russian conference with international participation "Computer integration of production and IPI-technology", Orenburg, November 18–19, 2021]. Orenburg; 2021. P. 385–389. (In Russ.)

13. Dib O., Manier M.-A., Moalic L. Advanced modeling approach for computing multicriteria shortest paths in multimodal transportation networks. In: *2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*. Singapore; 2016. P. 40–44. DOI: 10.1109/ICITE.2016.7581304

14. Bronshtein E.M., Zaiko T.A. Deterministic optimizational problems of transportation logistics. *Automation and Remote Control*. 2010;71(10):2132–2144. DOI: 10.1134/S0005117910100127

15. Kozlov P.A., Vladimirskaia I.P. Optimization methods in interaction between railroad and sea-transport. *Transport of the Russian Federation*. 2009;1(20):53–55. (In Russ.)

16. Jabir E., Panicker V.V., Sridharan R. Multi-objective optimization model for a green vehicle routing problem. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015;189:33–39. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.03.189

17. Panchenko V.V. Market information: structure and features. *Scientific notes Kazan Bauman state academy of veterinary medicine*. 2015; 221(1):164–168. (In Russ.)

18. Yurchenkov V.A., Kotelev S.G. [Evaluation of the efficiency of the logistics system of the enterprise]. In: *Sbornik materialov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy razvitiya"*, Cheboksary, 21 maya 2018 g. [Collection of materials of the X International scientific and practical Conference "Science, education, society: trends and prospects of development", Cheboksary, May 21, 2018]. Publishing house: Interactive Plus Center for Scientific Cooperation, LLC; 2018. P. 262–264. (In Russ.)

19. Baran J., Dark J. Multiple criteria evaluation of transportation performance for selected agribusiness companies. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013;34(6):1561–1584.

20. L'och M., Dolinayova A. Evaluation quality the freight transport through application of methods multi-criteria decision. *Procedia Economics and Finance*. 2015;34:210–216. DOI: 10.1016/S2212-5671(15)01621-4

21. Shepel V.N., Speshilova N.V., Kitaeva M.V. Technology of Management Decision-Making at Industrial Enterprises in the Digital Economy. *GCPMED 2018 – International Scientific Conference "Global Challenges and Prospects of the Modern Economic Development"*, Samara, Russia, 06–08 December 2018. *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS*. 2019. Vol. 57. P. 1520–1531. DOI: 10.15405/epsbs.2019.03.155. Available at: <https://www.futureacademy.org.uk/files/images/upload/GCPMED%202018F155.pdf>.

22. Bolodurina I.P., Nugumanova A.A. Wiener's filter as a reprocessing method of information with GLONASS system. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intellect. Innovations. Investments*. 2016;8:79–83. (In Russ.)

23. Kurmanova E.L. [As a 3PL provider – the basis for the formation of the market of transport and logistics services]. *Vestnik Universiteta*. 2013;2:61–64. (In Russ.)

24. Panyukov A.V., Pivovarova Yu.V. Development of Transport Logistics in the Chelyabinsk Region: Problems and the Prospects of Using Information Technologies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management*. 2017;11(1):7–11. (In Russ.). DOI: 10.14529/em170101

25. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Analiz, sintez, planirovanie resheniy v ekonomike* [Analysis, synthesis, decision planning in economics]. Moscow: Finansy i statistika; 2000. 368 p. (In Russ.)

26. Ojha A., Mondal M.K., Maiti M. Transportation policies for single and multi-objective transportation problem using fuzzy logic. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011;53(9–10):1637–1646. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.12.029

27. Danelyan T.Ya. Formal methods of expert estimations. *Economics, Statistics and Informatics*. 2015;1:183–187. (In Russ.)

28. Shepel V.N., Rakhmatullin R.R., Tripkosh V.A., Speshilov E.A. *Putevoy list* [Tour guide]. Certificate of official registration of a computer program, no. 2021660670, Rospatent, 30.06.2021.

Информация об авторах

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ipbolodurina@yandex.ru.

Спешиллов Евгений Алексеевич, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; младший научный сотрудник, Оренбургский филиал Института экономики УрО РАН, Оренбург, Россия; evgenij.sp@mail.ru.

Information about the authors

Irina P. Bolodurina, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; ipbolodurina@yandex.ru.

Evgeny A. Speshilov, Postgraduate Student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; Junior Researcher, Orenburg Branch of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia; evgenij.sp@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.03.2023

The article was submitted 18.03.2023

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК КОНЕЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ПРОЦЕССА ЦИФРОВИЗАЦИИ

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

И.Н. Голлай, gollaiin@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1022-4659>

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

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу трактовок понятий, связанных с процессом внедрения информационных технологий и систем, а именно: «информатизация», «цифровизация» и «цифровая трансформация». Дана критическая оценка различных подходов к определениям вышеозначенных терминов. Актуальность исследования подтверждается тем, что, несмотря на стремительное проникновение информационно-коммуникационных технологий во все сферы жизни и деятельности человека, методологическая база в данной области исследования до сих пор остается недостаточно проработанной, особенно в вопросе терминологии, вследствие чего наблюдается хаос в интерпретации понятий и не вполне корректное их использование. **Цель работы.** Исследование направлено на систематизацию подходов к определению понятий «информатизация», «цифровизация» и «цифровая трансформация», дифференциацию данных терминов и уточнению их трактовок. **Материалы и методы.** В процессе написания статьи были задействованы общенаучные методы и приемы исследования: описательный метод, метод сравнения, метод аналогий, исторический метод, структурно-функциональный метод, методы обобщения и типологизации, а также системный подход. В основу исследования легли материалы отечественных ежегодных статистических наблюдений в области оценки уровня развития и внедрения информационных технологий, а также результаты рейтингования стран по уровню освоения данных технологий, проводимых крупнейшими зарубежными консалтинговыми компаниями, агентствами и исследовательскими центрами, изучены различные методические материалы и теоретические обзорные статьи по теме исследования с целью их обобщения и систематизации. **Результаты.** В статье представлены результаты сравнительного анализа ряда терминов, связанных с процессом внедрения цифровых технологий, проведена их дифференциация, установлены основные признаки и характеристики каждого из них. Даны определения уточняющего характера следующих понятий: «информатизация», «цифровизация» и «цифровая трансформация». Информатизацию, оцифровку, автоматизацию, цифровизацию и цифровую трансформацию предлагается рассматривать в качестве последовательных содержательных этапов в процессе внедрения информационных систем и технологий. При этом цифровая трансформация социально-экономических систем рассматривается в качестве конечного желаемого результата процесса цифровизации, при котором наблюдается качественный скачок (прорыв) в развитии социально-экономической системы и происходит переосмысление и перестройка большинства наиболее важных процессов (бизнес-процессов). Подобные качественные преобразования ведут к изменению бизнес-модели, затрагивая все элементы системы. **Заключение.** Преимуществом предложенного в рамках данного исследования подхода является то, что все вышеобозначенные термины рассматриваются здесь не изолированно, а во взаимосвязи, являясь частью общего процесса, отражая сущность и содержание такого сложного и неоднозначного явления, как цифровая трансформация.

Ключевые слова: информатизация, автоматизация, цифровизация, цифровая трансформация, ИТ, информационные технологии, цифровая экономика, информационное общество

Для цитирования: Голлай А.В., Голлай И.Н., Логиновский О.В. Цифровая трансформация социально-экономических систем как конечный результат процесса цифровизации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 65–81. DOI: 10.14529/ctcr230206

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230206

DIGITAL TRANSFORMATION OF SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS AS THE END RESULT OF THE DIGITALIZATION PROCESS

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

I.N. Gollay, gollaiin@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1022-4659>

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to a comparative analysis of the interpretations of concepts related to the process of introducing information technologies and systems, namely: “informatization”, “digitalization” and “digital transformation”. A critical assessment of various approaches to the definitions of the above terms is given. The relevance of the study is confirmed by the fact that despite the rapid penetration of information and communication technologies into all spheres of human life and activity, the methodological base in this area of research is still insufficiently developed, especially in terms of terminology. As a result, there is chaos in the interpretation of concepts and their not quite correct use. **The purpose of the work.** The study is aimed at systematizing approaches to the definition of the concepts of “informatization”, “digitalization” and “digital transformation”, differentiating these terms and clarifying their interpretations. **Materials and methods.** In the process of writing the article, general scientific methods and research techniques were involved: a descriptive method, a comparison method, an analogy method, a historical method, a structural-functional method, methods of generalization and typology, as well as a systematic approach. The study was based on the materials of domestic annual statistical observations in the field of assessing the level of development and implementation of information technologies, as well as the results of rating countries in terms of the level of development of these technologies, conducted by the largest foreign consulting companies, agencies and research centers, studied various methodological materials and theoretical overviews. **Results.** The article presents the results of a comparative analysis of a number of terms related to the process of introducing digital technologies, their differentiation is carried out, the main features and characteristics of each of them are established. Definitions of the clarifying nature of the following concepts are given: “informatization”, “digitalization” and “digital transformation”. Informatization, digitization, automation, digitalization and digital transformation are proposed to be considered as successive meaningful stages in the process of introducing information systems and technologies. At the same time, the digital transformation of socio-economic systems is considered as the final desired result of the digitalization process, in which a qualitative leap (breakthrough) is observed in the development of the socio-economic system and most of the most important processes (business processes) are rethought and restructured. Such qualitative transformations lead to a change in the business model, affecting all elements of the system. **Conclusion.** The advantage of the approach proposed in the framework of this study is that all the above terms are considered here not in isolation, but in interconnection, being part of a general process, reflecting the essence and content of such a complex and ambiguous phenomenon as digital transformation.

Keywords: informatization, automation, digitalization, digital transformation, IT, information technologies, digital economy, information society

For citation: Hollay A.V., Gollay I.N., Loginovskiy O.V. Digital transformation of socio-economic systems as the end result of the digitalization process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):65–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230206

Введение

В последнее время темпы развития и внедрения информационных технологий бьют все рекорды. Digital-индустрия набирает обороты, вследствие чего информационные технологии проникают во все сферы деятельности.

Стремительность процесса цифровизации отмечают в своих отчетах все международные рейтинговые компании и исследовательские центры. Однако оценить однозначно место России в

общемировых рейтингах является сложной задачей из-за противоречивости предоставляемых в них данных.

Так, в международном рейтинге *Global Innovation Index*, формируемом Всемирной организацией интеллектуальной собственности (*World Intellectual Property Organization – WIPO*), России на текущий момент отведено 47-е место из 132 стран по уровню развития информационно-коммуникационных технологий. При этом наша страна всего за 2 прошедших года поднялась на 15 позиций вверх в данном списке (с 62-го места до 47-го). В данный рейтинг включены страны, на долю которых приходится 94,3 % населения мира и 99,0 % мирового ВВП по паритету покупательной способности, что говорит о высокой оценке достижений России в данной области [41].

Однако следует отметить, что в соответствии с другими мировыми рейтингами не все так оптимистично. По оценке агентства *Bloomberg* (рейтинг *Bloomberg Innovation Index*) Россия в 2020 году занимала 26-е место из 60 стран мира, отобранных для обследования уровня развития цифровой экономики. При этом в 2015 году в соответствии с данным рейтингом она занимала более высокую позицию, находясь на 15-м месте [38].

Согласно *IMD World Digital Competitiveness Ranking*, Центра мировой конкурентоспособности (*World Competitiveness Center*), Россия по итогам 2019 года занимала 38-е место с точки зрения способности внедрять и осваивать новые цифровые технологии. Обследование проводилось в отношении 63 стран по 51 критерию, которые были разделены на три группы: готовность к будущему, знания и технологии. В 2023 году эти критерии были расширены до 54. Однако из-за ограниченной достоверности собранных данных Россия не была включена в последнее проведенное исследование [39].

Таким образом, результаты оценки места и роли России в общемировом процессе цифровой трансформации нельзя назвать однозначными и объективными.

В соответствии с данными российских статистических наблюдений, темпы изменения индикаторов цифровизации за последние годы показывают хорошие результаты [30]. Процент использования информационно-коммуникационных технологий российскими предприятиями по ключевым отраслям варьируется от 95 до 100 % [8–10, 35]. Наибольшие значения данный показатель достигает в сфере телекоммуникаций и в системе высшего образования.

Несмотря на активное внедрение передовых информационных технологий и систем, а также рост популярности терминов, связанных с цифровизацией, приходится констатировать, что единство в трактовках ряда подобных терминов до сих не достигнуто. Многополярность мнений относительно сути таких понятий, как «цифровизация», «информатизация», «цифровая трансформация» и прочих, приводит к тому, что значения этих терминов остаются размытыми, а сами термины часто используются не по назначению. При этом в нормативно-законодательной базе России данные термины также четко не определены. Приходится констатировать, что методологическая база в части используемого понятийно-терминологического аппарата в рассматриваемой области требует совершенствования. Это и предопределило направление данного исследования.

Сравнительный анализ трактовок понятий, связанных с цифровой трансформацией

Проведенный анализ различных подходов к раскрытию сущности и содержания таких понятий, как «информатизация», «автоматизация», «цифровизация» и «цифровая трансформация», чаще всего используемых при оценке уровня освоения информационных технологий, позволил выявить широкий диапазон взглядов и авторских трактовок.

Замечено, что раскрытие сущности и содержания терминов обычно осуществляется с использованием одного или нескольких следующих подходов, когда явление характеризуется: как процесс (в этом случае в определении указывается, какие действия реализуются), как система (при этом указывается набор основных элементов системы и/или их взаимосвязь) или как результат (при таком варианте раскрытия сути дефиниции указываются цели или результаты процесса или явления).

Проведенный сравнительный анализ трактовок выявил, что в большинстве случаев, данные термины раскрываются через процессный подход. Обобщение результатов проведенного анализа по раскрытию сущности и содержания понятий «информатизация», «автоматизация», «цифровизация», «цифровая трансформация» представлено в табличном виде (см. таблицу).

Результаты сравнительного анализа определений понятий «информатизация», «автоматизация», «цифровизация», «цифровая трансформация»

The results of a comparative analysis of the definitions of the concepts “informatization”, “automation”, “digitalization”, “digital transformation”

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Термин «информатизация»		
Коробко О.С. [16]	«Информатизация посредством внедрения информационно-коммуникационных технологий в различные сферы человеческой деятельности создала базу для перехода к цифровизации...» [16, с. 6]	Внедрение ИКТ, база для перехода к цифровизации
Рузина Е.И. [28]	Информатизация – это «...применение различного программного обеспечения и технических средств для ускорения/удешевления/популяризации производства товаров и оказания услуг» [28, с. 96]	Применение ПО и технических средств
Ковалев С.Д., Курьесев К.Н. [14]	Информатизация – это период, который «...длился на протяжении 20 лет и создал предпосылки для следующего этапа – цифровизации» [14]	Период, создавший предпосылки для цифровизации
Днепроvская Н.В. [6]	Информатизация представляет собой процесс быстрого распространения информационных аналитических систем и систем управления в различных отраслях экономики, в науке и в образовании; второй этап процесса внедрения ИКТ в экономические системы [6]	Процесс распространения ИАС и систем управления
Термин «автоматизация»		
Бостанова Л.К., Шаманова А., Тебуева Д. [3]	«Автоматизация улучшает производство, однако при ней сохраняется способ ведения дел на предприятии» [3, с. 288]	Процесс совершенствования производства (бизнес-процессов) с сохранением способов хозяйствования
Днепроvская Н.В. [6]	Автоматизация – первый этап процесса внедрения информационно-коммуникационных технологий в экономические системы, «...который сопровождался внедрением в практику программных алгоритмов расчетов» [6, с. 17]	Первый этап процесса внедрения ИКТ, внедрение программных алгоритмов расчетов
Орлов М.А., Северухин В.А. [27]	«Представляется наиболее эффективным раскрыть понятие автоматизации... через выявление сущности данного процесса. Сущность такого междисциплинарного явления, как автоматизация, можно раскрыть через несколько факторов. Во-первых, автоматизация в любой области призвана снизить нагрузку на человека в его повседневной деятельности. Во-вторых, ограничение человеческой деятельности должно способствовать повышению качества выполнения автоматизированных функций, так как предполагается ограничение фактора несовершенства человеческого внимания, знаний, умений и т. д. Наконец, автоматизированные процессы позволяют получать как более качественный результат, так и способствовать повышению квалификации человека, занятия его интеллектуальным трудом более высокого уровня» [27, с. 147]	Результатный подход
Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.М [21]	«Замена труда человека в операциях управления действиями технических управляющих устройств называется автоматизацией. Задача автоматизации состоит в осуществлении автоматического управления различными техническими процессами» [21, с. 7]	Замена труда человека действиями технических устройств

Продолжение таблицы
Table (continued)

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Кудряшов В.С., Алексеев М.В., Иванов А.В., Гайдин А.А. [19]	«Определение автоматизации сводится к одному из направлений научно-технического прогресса, использующее программно-технические средства и математические методы с целью освобождения человека от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, изделий или информации, либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоемкости выполняемых операций» [19, с. 57]	Направление НТП, применяющее программно-технические средства и математические методы, чтобы освободить человека от работы
Термин «цифровизация»		
Бостанова Л.К., Шаманова А., Тебуева Д. [3]	«Цифровизация – внедрение цифровых технологий в разные сферы жизни в глобальном плане» [3, с. 286]	Процесс внедрения цифровых технологий
	«Цифровизация... представляет собой концепцию экономической деятельности, основанной на цифровых технологиях, внедряемых в разных сферах жизни» [3, с. 286]	Концепция экономической деятельности
	«В основе цифровизации лежит аналитика данных – процесс преобразования первичных данных в полезные знания, которые можно использовать... Оцифрованные данные... используют, чтобы упростить и оптимизировать, например, бизнес-операции» [3, с. 287]	Инструмент для упрощения и оптимизации бизнес-операций и проведения аналитики данных
	«Смысл цифровизации информационных систем в том, чтобы современному человеку не нужно было напрягаться и бороться с человеческим фактором в системе» [3, с. 290]	Способ исключения человеческого фактора при работе системы
Набиева Н.Ю., Симаева Н.П. [24]	Цифровизация «...представляет собой тренд, пришедший на замену информатизации и компьютеризации» и который «...можно охарактеризовать следующим образом: в качестве основания использует электронно-цифровой формат данных, что в рамках социальной и экономической жизни ведет к повышению экономического потенциала и росту качества жизни» [24, с. 115]	Современный тренд развития IT-индустрии
	«Цифровизация как процесс подразумевает принципиально новый способ хранения, обработки и использования информации» [24, с. 116]	Процесс работы с информацией
	Цифровизация «...предполагает достижение таких целей, как: падение в стоимости и высокую защищенность сбора, систематизации, отправки и анализа данных...; сокращение стоимости и упрощение взаимодействий в социуме и экономике; разработку системы для мультикоммуникации людей и бизнес-процессов по горизонтали и вертикали» [24, с. 116]	Результатный подход
Эмирова Э.С., Ветеранова Д.С., Бекирова Э.А. [37]	«Цифровизацией принято считать процесс внедрения цифровых технологий в различные сферы развития общества: культуру, экономику, образование и т. д. Цифровизация предполагает применение информационно-коммуникационных технологий с применением сети Интернет, благодаря которым доступно проведение анализа структурных элементов цифровой экономики, а также построение моделей ее развития» [37, с. 231]	Процесс внедрения ИТ

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Кузнецов Р.А. [20]	«Цифровизация – это процесс, который предполагает использование цифровых технологий и оцифрованных данных для трансформации процессов, моделей взаимодействия людей в окружающей среде» [20, с. 4] «Цифровизация влияет на частоту и скорость коммуникаций..., повышая эффективность взаимодействия людей» [20, с. 4–5]	Процесс использования цифровых технологий и оцифрованных данных Результатный подход
Толковый словарь по информационному обществу и новой экономике [31]	«Цифровизация – преобразование информации в цифровую форму» [31]	Процесс оцифровки информации
Коробко О.С. [16]	«...Цифровизация будет рассматриваться как процесс перехода с аналоговой формы передачи информации на цифровую и внедрение цифровых технологий в различные сферы деятельности человека» [16, с. 7]	Процесс оцифровки информации и внедрения цифровых технологий
Мещерякова Н.Н., Роготнева Е.Н. [23]	Цифровизация – «...системно-деятельностный процесс овладения информацией как ресурсом управления и развития с помощью технических средств и цифровой инфраструктуры с целью создания цифрового общества и на этой основе – дальнейшего прогресса цивилизации» [23, с. 46] «В целом цифровизацию можно рассматривать как механизм перехода общества постиндустриального в свою завершающую стадию – цифровое общество» [23, с. 46]	Системно-деятельный процесс овладения информацией Механизм перехода к цифровому обществу
Кудрявцева Т.Ю., Кожина К.С. [18]	Цифровизация (<i>digitalization</i>) – «...использование оцифрованной информации и цифровых технологий для внесения изменений в бизнес-процессы и бизнес-модели» [18, с. 150] «В свою очередь цифровизация является составной частью цифровой трансформации компании...» [18, с. 150]	Процесс использования оцифрованной информации и цифровых технологий Часть процесса цифровой трансформации
Иванова И.К., Бойкова Е.В. [7]	Цифровизация – последняя и самая сложная условная стадия развития цифровой экономики, которая «...ведет к существенным качественным изменениям бизнес-процессов и направляет всю финансовую систему к изменениям» [7, с. 106]	Заключительная стадия развития цифровой экономики
Вороненко Д.В., Иванова И.К. [4]	«Цифровизация работает инструментом переустройства организации на различных уровнях: руководство, производство, контроль и др., он применяется в каждом из них» [4, с. 64]. «Цифровизация – это полное преобразование бизнеса на абсолютно всех уровнях образования стоимости на базе применения цифровых технологий, оптимизации бизнес-процессов и управления с целью упрощения взаимодействия с покупателями, работниками, поставщиками и иными стейкхолдерами» [4, с. 64] «Цифровизация подразумевает собой непростую технологическую процедуру: в данной стадии совершается формирование совершенно новых исследований, чаще всего основанных на IT-решениях и инновациях. Цифровизация приводит к увеличению производительности труда и в целом к производительности производства и коммуникации с разными сторонами: поставщиками, покупателями, государством, – либо может касаться внутрикорпоративных взаимоотношений» [4, с. 64]	Инструмент переустройства организации на базе применения цифровых технологий Стадия формирования новых исследований, основанных на IT-решениях и инновациях

Продолжение таблицы
Table (continued)

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Катрин Е.В. [13]	«...Цифровизация – это процесс, включающий создание, внедрение и применение цифровых систем и технологий и (или) трансформация инструментов (объектов, систем и технологий) взаимодействия государства, общества и человека» [13, с. 52]	Процесс внедрения цифровых систем и технологий и (или) трансформация коммуникационных инструментов
Коньков А.Е. [15]	Цифровизация – «...перевод в информационную форму (отражение в битах) всего многообразия материального мира (существующего в атомах)» [15, с. 47]	Процесс перехода на информационную форму представления данных
Чернобровкина Е.Д. [36]	Процесс цифровизации может рассматриваться в качестве «...длительного, многоаспектного и сложного процесса преобразования производственных и управленческих операций, а также информационных ресурсов для эффективного применения цифровых платформ и технологий с целью повышения производительности и структурирования информации» [36, с. 173]	Сложный процесс преобразования бизнес-операций и информационных ресурсов
Рузина Е.И. [28]	«...Цифровизация – это качественно новый уровень развития экономики, на котором инициируются технологические сдвиги и прогресс, повышается точность и эффективность работы на производственных процессах, происходит ее оптимизация. Мы считаем, что речь идет о подходе к искусственному интеллекту, к ситуации замены человека... цифровыми системами» [28, с. 96]	Качественно новый эффективный уровень развития экономики (результатный подход)
	«...Цифровизация есть инструмент цифровой трансформации. ...Использование цифровых технологий... для соответствия новым методам цифровой экономики» [28, с. 96]	Инструмент цифровой трансформации
Цветкова А.В. [34]	«Под цифровизацией понимается процесс внедрения цифровых технологий во все сферы с целью развития экономики и повышения уровня жизни населения. Также, говоря о цифровизации, имеют в виду переход информации в цифровую форму» [34, с. 15].	Процесс внедрения цифровых технологий и переход информации в цифровую форму
Ковалев С.Д., Курьесев К.Н. [14]	«...Цифровизация – это этап информатизации общества, затрагивающий различные стороны общественного развития, специфика которого состоит в расширении практики использования данных в цифровой форме, упрощения всех сфер человеческой деятельности, на основе перевода, трансформации технологий в цифровой вид» [14, с. 134]	Этап информатизации общества, трансформация технологий в цифровой вид
Днепровская Н.В. [6]	Цифровизация – третий (современный) этап процесса внедрения информационно-коммуникационных технологий, «...характеризующийся созданием и внедрением цифровых платформ» [6, с. 17]	Третий этап процесса внедрения ИКТ, процесс создания и внедрения цифровых платформ
Меланьина М.В., Ахмед Надир, Пономарева В.С. [22]	«...Цифровизация – это динамический процесс, последовательное углубление и расширение использования цифровых технологий в различных сферах (социальная сфера, экономическая деятельность), видах деятельности (торговля, например), в том числе в различных отраслях (сельское хозяйство, транспорт, промышленность)» [22, с. 82–83]	Динамический процесс использования цифровых технологий

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Термин «цифровая трансформация»		
Бостанова Л.К., Шаманова А., Тебуева Д. [3]	«Цифровая трансформация – ...глубокий и масштабный процесс, когда происходит преобразование с помощью цифровых решений – выход на новые рынки, создание новых каналов продаж и решений, которые приводят к увеличению стоимости компании» [3, с. 287]	Процесс, направленный на увеличение стоимости компании
	«...При цифровой трансформации меняется сам продукт, трансформируются взаимоотношения между клиентом и поставщиками, позиционирование самой компании. Это комплексный подход к использованию цифровых ресурсов на предприятии» [3, с. 288]	Комплексный подход к использованию цифровых ресурсов
	«В бизнесе цифровая трансформация способствует оптимизации и повышению точности работы и предполагает переход компании на электронные платформы» [3, с. 288]	Переход на электронные платформы + результатный подход
Савельев И.И., Абдуллаев Н.В. [29]	«Цифровизация или цифровая трансформация – это системный подход к использованию цифровых ресурсов для повышения производительности труда, конкурентоспособности и экономического развития в целом, а не просто наличие в офисе компьютеров и подключения к интернету» [29, с. 14]	Цифровизация – цифровая трансформация, системный подход к использованию цифровых ресурсов
Чернобровкина Е.Д. [36]	Цифровая трансформация рассматривается «...в качестве результата цифровизации государственного института для использования им новых технологий с целью автоматизации протекающих в нем процессов. Также следует отметить, что крайней точкой цифровой трансформации является цифровое государство...» [36, с. 173–174]	Результат процесса цифровизации
Кудрявцева Т.Ю., Кожина К.С. [18]	Цифровая трансформация (<i>digital transformation</i>) «...предполагает полную перестройку бизнеса, которая определяется цифровыми технологиями» [18, с. 150]. Цифровая трансформация представляет собой полную перестройку «...на основе новых возможностей и новых требований, определяемых цифровыми технологиями. Единичный проект по цифровизации не является цифровой трансформацией. К цифровой трансформации относят осуществление нескольких проектов, предполагающих кастомизированную стратегическую трансформацию компании в долгосрочной перспективе» [18, с. 150]	Процесс значительной перестройки бизнеса под влиянием цифровых технологий
Рузина Е.И. [28]	Цифровая трансформация предполагает «...изменение стратегии, процессов, организационной структуры, логистики, самой модели бизнеса... и включает в себя цифровизацию». «...Если в цифровизации делается акцент на Big Data (большие данные), то в цифровой трансформации – на Data Governance (стратегическое управление данными)» [28, с. 96]	Изменение стратегии, процессов и модели бизнеса

Окончание таблицы
Table (end)

Автор (авторы) определения и источник	Определение	Суть определения (резюме)
Ковалев С.Д., Курьсов К.Н. [14]	«Результатом процесса цифровизации выступает цифровая трансформация» [14, с. 134]	Результат процесса цифровизации
	«...Термин «цифровая трансформация» связан с глобальным проникновением цифровизации во все сферы жизни, приводящей к реструктуризации различных общественных институтов, экономики и общества» [14, с. 134]	Проникновение цифровизации во все сферы жизни
	«Для бизнеса цифровая трансформация – это всеобъемлющий процесс интеграции цифровых технологий в новую или существующую производственную модель» [14, с. 134]	Процесс интеграции цифровых технологий
	«...Цифровая трансформация – это комплекс организационно-технических мер, направленных на интеграцию digital-технологий в государственные и бизнес-структуры, с целью их глубоких технических преобразований, фундаментальных изменений в подходах к управлению, качественных изменений в их работе» [14, с. 135]	Комплекс организационно-технических мер по внедрению digital-технологий
Ниязова Ю.М. [26]	«Цифровая трансформация – это ключевой фактор современного развития. Она выступает в различных статусах, являясь одновременно:	
	драйвером роста, обеспечивающим построение цифровых бизнес-моделей...;	Драйвер роста, ключевой фактор развития
	инструментом повышения эффективности на основе трансформации операционной модели бизнеса на цифровые технологии...;	Инструмент повышения эффективности
	базисом для прорывных инноваций, являющимся основой создания корпоративного инкубатора и венчурного капитала...» [26, с. 71]	Базис для прорывных инноваций

Наличие суффикса «-ция-» во всех указанных дефинициях говорит о том, что данные слова являются заимствованными и относятся к так называемым англицизмам. Причем, как мы далее увидим, вхождение данных слов в русский лексикон – это не всегда простая «лексическая калька» слов, созданных под влиянием иноязычных образцов, когда применяется метод транслитерации.

По мнению авторов работы [3], следует различать процессы автоматизации и цифровизации. Последний, как правило, включает в себя автоматизацию производства и является более масштабным явлением. С данным утверждением трудно не согласиться. Однако данные авторы в своем исследовании далее отмечают, что «цифровизация – ...это изменение рабочей модели в целом, достижение полной цифровой трансформации» [3, с. 287]. На основе данного высказывания можно заключить, что данные авторы ставят знак равенства между понятиями «цифровизация» и «цифровая трансформация», хотя, по нашему мнению, это не так. Рассмотрим, чем отличаются данные термины. Для этого потребуется рассмотреть, как осуществлялся процесс внедрения информационно-коммуникационных технологий с точки зрения исторической ретроспективы.

Проведенный анализ показал, что многие авторы [3, 14, 18, 25] процесс внедрения информационных технологий в социально-экономических системах разделяют на ряд последовательных этапов. При этом указывается, что на первом этапе шло «...развитие технологической инфраструктуры и использование больших баз данных» [3, с. 287]. Следующий этап «...характеризовался расширением доступа в интернет» [3, с. 287]. И, наконец, современный этап отличает «...интеграция широкого спектра цифровых сервисов, продуктов и систем в киберфизическую систему» [3, с. 287].

Другие ученые и научные коллективы выделяют в рамках своих исследованиях следующие этапы на пути цифровых преобразований [6, 17, 24, 36]:

- 1) информатизация;
- 2) компьютеризация;
- 3) цифровизация.

Поясняя содержательную сторону выделенных этапов, авторы работы [24] отмечают, что если «процессы информатизации и компьютеризации характеризовались внедрением вычислительной техники и компьютеров...», то на этапе цифровизации «...новшества цифрового представления информационных данных привели к формированию независимого технологического пространства в виде экосистем и платформ...», которые используются для решения различного класса задач, в частности, для «...создания технологической, инструментальной, партнерской, методической и других сфер окружения...» [24, с. 116]. Авторы здесь не приводят четкую характеристику этапа «информатизация» и соотносят его с началом использования вычислительной техники. Мы же считаем данный этап наиболее ранним на пути внедрения и освоения ИТ и не обязательно связанным с внедрением подобной техники. В данном случае корректнее было бы говорить о таком этапе, в рамках которого происходит осознание роли и значения информации в ходе реализации предприятием (организацией) бизнес-процессов (этап информатизации).

Следует также отметить, что отдельные исследователи не видят особых различий между понятиями «информатизация» и «цифровизация» [16, 29], однако данные понятия не являются идентичными по своему смыслу и содержанию.

Мы согласны с мнением, высказанным в работе [1], в которой автор отмечает, что информацией являются сведения, независимо от формы их представления, следовательно, соотнося понятие «...«информационный» с понятием «цифровой» (отражающее именно форму представления информации), видно, что «информационный» применяется к терминам значительно шире по смысловому охвату» [1, с. 301]. Учитывая, что информация может представляться в аналоговом (например, на бумажных носителях) и в цифровом виде, то логичным будет выделение еще одного важного этапа в процессе освоения информационных технологий и систем, такого как «оцифровка». За рубежом данный термин носит название *digitization*, четко дистанцирован от понятия «цифровизация» (*digitalization*) и предшествует последнему.

Так, в словаре крупной консалтинговой компании *Gartner* (*Gartner Glossary*) используются следующие термины: *digitization*, *digitalization* и *digital business transformation* [40], которые выступают в качестве важных вех на пути преобразования бизнеса.

Digitization (оцифровка) – это процесс перехода от аналоговой к цифровой форме, также известный как внедрение цифровых технологий. Другими словами, оцифровка берет аналоговый процесс и преобразует его в цифровую форму без каких-либо изменений в самом процессе [40].

Digitalization (цифровизация) – это использование цифровых технологий для изменения бизнес-модели и предоставления новых возможностей получения дохода и создания ценности; это процесс перехода к цифровому бизнесу [40].

Digital business transformation (цифровая трансформация бизнеса) – это процесс использования цифровых технологий и вспомогательных возможностей для создания новой надежной цифровой бизнес-модели [40].

Из приведенных здесь определений становится понятным, чем оцифровка (*digitization*) отличается от цифровизации (*digitalization*). Если оцифровка (*digitization*) предполагает простой процесс перевода информации из аналогового формата в цифровую (двоичную систему счисления), которая может храниться, передаваться и использоваться посредством ПК, при этом не предполагается внесение каких-либо изменений в бизнес-процессы компаний, то в рамках процесса цифровизации (*digitalization*) происходит внесение изменений в отдельные бизнес-процессы, в результате чего наблюдается рост производительности и эффективности реализации этих бизнес-процессов. К такому же выводу приходят авторы работ [18, 42]. Например, в работе [18] отмечается, что «оцифровка – это больше о системе записи, в то время как цифровизация – это о системах взаимодействия и о системах понимания и использования оцифрованных данных» [18, с. 149].

Из определений, предложенных компанией *Gartner*, остается не ясной грань между понятиями «цифровизация» (*digitalization*) и «цифровая трансформация» (*digital business transformation*),

так как и там, и там говорится об использовании информационных технологий и изменении бизнес-модели.

Проведя анализ трактовки понятия «цифровизация», установили, что большинство ученых предлагают рассматривать его в «узком» и «широком» смысле [2, 5, 14–16, 28, 31, 33, 34, 36]. В узком смысле, с их точки зрения, цифровизация представляет собой преобразование информации в цифровую форму, которое в дальнейшем приводит к оптимизации издержек, появлению новых перспектив развития, а в широком смысле цифровизация выступает в качестве процесса внедрения цифровых технологий в рамках той или иной социально-экономической системы. На самом же деле в первом случае (узкий подход) имеет место такой процесс, как оцифровка (*digitization*) данных, а во втором (широком подходе) – речь может идти об автоматизации и компьютеризации.

По нашему мнению, цифровизация, предполагающая внедрение и активное использование тех или иных цифровых технологий, устройств и программных продуктов, выступает в качестве одного из важнейших этапов на пути к цифровой трансформации, хотя, к слову сказать, не всегда к ней приводит. Цифровизация, рассматриваемая нами через призму *процессного подхода*, представляет собой процесс, направленный на повышение эффективности отдельных функций и операций социально-экономической системы посредством внедрения информационных технологий и систем.

Сравнивая понятия «цифровизация» и «цифровая трансформация», следует обратить внимание на то, что когда говорят о цифровизации, то говорят о цифровизации *процессов*, в то время как когда речь идет о цифровой трансформации, то имеют в виду цифровую трансформацию *бизнеса* в целом, а не отдельно взятых процессов. В этой связи «цифровую трансформацию» мы предлагаем рассматривать с использованием *результатного подхода*, т. е. как желаемый результат процесса цифровизации, когда наблюдается качественный скачок (прорыв) в развитии организации и происходит переосмысление и перестройка большинства наиболее важных бизнес-процессов. Подобные качественные преобразования бизнеса ведут к изменению бизнес-модели, затрагивая все элементы системы.

Мы согласны с мнением тех ученых, которые считают, что персональные компьютеры, интернет и информационные системы являются лишь инструментами, позволяющими упростить и автоматизировать некоторые процессы, однако сами по себе они не ведут к цифровой трансформации. Для этого необходимо задействовать комплексный подход при использовании цифровых ресурсов предприятия. По верному замечанию коллектива авторов работы [3] установка компьютерного оборудования на предприятии, обеспечение выхода в глобальную сеть и установка информационной системы еще не делают данное предприятие «цифровым». Так же как и наращивание производительности компьютерной техники само по себе не ведет к цифровой трансформации бизнеса.

Наша точка зрения подтверждается и этимологией базового термина «трансформация», которая происходит от лат. слова *transformatio* – преобразование, превращение, видоизменение и может рассматриваться в качестве способа развития какой-либо системы под воздействием различных факторов [12]. В работе [11] отмечается, что данный термин «...возник в связи с необходимостью этапной оценки качественной характеристики коренных изменений экономических систем, носящих необратимый характер и образующих определенное состояние перехода в новое качество на пути к формированию будущей модели» [11, с. 28]. Автор отмечает, что такое явление в виде известных скачков характерно для процесса эволюции. Результатом процесса цифровизации может явиться цифровая трансформация социально-экономической системы, характеризующая переходом данной системы на новый качественный уровень, когда возникает необходимость переосмыслить саму модель, по которой реализуются ее бизнес-процессы, и общую стратегию развития.

Заключение

Сравнительный анализ определений понятий «информатизация», «автоматизация», «цифровизация» и «цифровая трансформация» с использованием самых последних и наиболее актуальных данных по этому вопросу позволил установить, что в большом массиве научно-исследовательских работ нет единого мнения относительно содержания данных терминов. Пере-

осмысление и обобщение сложившихся подходов к раскрытию сущности указанных ранее понятий позволило предложить собственные трактовки данных дефиниций, увязав их между собой через призму исторической ретроспективы.

Процесс развития и внедрения цифровых технологий и систем с исторической точки зрения может быть characterized рядом следующих последовательных этапов, каждый из которых имеет свои особенности:

1) информатизация – процесс, связанный с усилением роли информации, когда последняя начинает рассматриваться бизнес-структурами в качестве важного фактора производства; первый и наиболее ранний этап на пути к цифровой трансформации;

2) оцифровка представляет собой процесс перевода информации из аналогового вида в цифровой формат и предполагает внедрение и использование цифровых устройств и технологий;

3) автоматизация – процесс перенесения выполняемых функций или отдельных операций с человека на технические устройства, характеризуемый повышением производительности и эффективности выполнения этих функций и операций;

4) цифровизация – процесс, при котором реализованы предыдущие этапы преобразований и который подразумевает внедрение и использование современных информационных технологий и оцифровку всех или большинства процессов для облегчения выполнения различных функций и операций без изменения общей бизнес-модели, при этом совершенствуются отдельные бизнес-процессы компании;

5) цифровая трансформация – это результат качественного преобразования социально-экономической системы под влиянием внедрения различных информационных технологий, когда меняется бизнес-модель организации и происходит кардинальное фундаментальное переосмысление бизнес-процессов, а также подходов к управлению, корпоративной культуре, внутренним и внешними коммуникациями. Таким образом, данные преобразования осуществляются в масштабах всей организации и затрагивают все важные процессы (бизнес-процессы) социально-экономической системы, обеспечивая значительный качественный прирост производительности и эффективности деятельности благодаря синергетическому эффекту от использования широкого арсенала современных информационных средств и технологий. В результате подобных преобразований социально-экономическая система *трансформируется* и выходит на новый качественный виток своего развития. Цифровая трансформация социально-экономических систем, в свою очередь, обеспечивает построение информационного общества, которое в соответствии со «Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» представляет собой «...такое общество, в котором информация и уровень ее применения и доступности кардинальным образом влияют на экономические и социокультурные условия жизни граждан» [32].

Преимуществом предложенного в рамках данного исследования подхода к раскрытию сущности и содержания процессов, связанных с цифровой трансформацией, является то, что все термины рассматриваются здесь не изолированно, а во взаимосвязи и, являясь звеньями одной цепи, показывают сложный путь внедрения и использования информационных систем и технологий с исторической точки зрения.

Список литературы

1. Базаров А.А., Сурков А.Н. Предпринимательство и цифровизация: понимание различий понятий «виртуальный», «цифровой», «информационный» как основа развития предпринимательских отношений // Сборник Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. Концепция развития частного права: стратегия будущего. 2020. С. 297–302.
2. Бессонов Н.К. Правовые аспекты понятия цифровизация в России // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. 2019. № 12 (39). URL: <https://Alley-science.ru>.
3. Бостанова Л.К., Шаманова А., Тебуева Д. К вопросу о цифровизации // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020, № 12-11(80). С. 286–291.
4. Вороненко Д.В., Иванова И.К. Понятие и элементы цифровизации экономики // Сборник научных статей 2-й Всероссийской конференции. Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. 2021. Т. 1. С. 63–65.
5. Данилова Л.Н., Ледовская Т.В., Солянин Н.Э., Ходырев А.М. Основные подходы к пониманию цифровизации и цифровых ценностей // Вестник Костромского государственного

университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. 2020. Т. 6, № 2. С. 5–12. DOI: 10.34216/2073-1426-2020-26-2-5-12

6. Днепровская Н.В. Оценка готовности российского высшего образования к цифровой экономике // Статистика и экономика. 2018. Т. 15, № 4. С. 16–28.

7. Иванова И.К., Бойкова Е.В. Цифровизация экономики: понятия и элементы // Экономический рост как основа устойчивого развития России: сб. науч. ст. участников 7-й Всерос. науч.-практ. конф. Курск, 2022. С. 104–107.

8. Индекс «Цифровая Россия»: Отражение цифровизации субъектов через призму открытых источников. Авторская методология с учетом российской специфики и лучших практик. Результаты замера индекса «Цифровая Россия» по субъектам Российской Федерации в 2018 году. М.: Московская школа управления «Сколково». URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Report_Full_2019-04_ru.pdf.

9. Индикаторы цифровой экономики: 2022: статист. сб. / Г.И. Абдрахманова, С.А. Васильковский, К.О. Вишневецкий, Л.М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2023. 332 с. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/780810055.pdf>.

10. Информационное общество в Российской Федерации – 2020: статист. сб. / Федеральная служба государственной статистики; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2020. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/lqv3T0Rk/info-ob2020.pdf>.

11. Карпунина Е.К. Трансформация как способ развития экономической системы // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2011, № 4 (96). С. 27–35.

12. Картаслов.ру – Карта слов и выражений русского языка. URL: <https://kartaslov.ru>.

13. Катрин Е.В. «Цифровизация»: научные подходы к определению термина // Вестник ЗабГУ. Политология. 2022. Т. 28, № 5. С. 49–54. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-5-49-54

14. Ковалев С.Д., Курьесев К.Н. К вопросу о содержании понятий «цифровизация», «цифровая трансформация» // Актуальные проблемы публичного права. Владимир, 2022. Вып. 16. С. 131–135.

15. Коньков А.Е. Цифровизация политики vs политика цифровизации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Международные отношения. 2020, № 13 (1). С. 47–68. DOI: 10.21638/spbu06.2020.104

16. Коробко О.С. Понятие и сущность цифровизации образования // Образовательный процесс в вузе в условиях цифровизации. Материалы международной научно-практической конференции. Омск, 2022. С. 6–12.

17. Кропотова Н.В. Цифровизация высшего образования: понятие и возможные риски // Январские педагогические чтения. 2021. № 7 (19). С. 25–30.

18. Кудрявцева Т.Ю., Кожина К.С. Основные понятия цифровизации // Вестник академии знаний. 2021, № 44 (3). С. 149–151. DOI: 1024412/2304-6139-2022-11228

19. Кудряшов В.С., Алексеев М.В., Иванов А.В., Гайдин А.А. Введение в профессиональную деятельность: учеб. пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2015. 155 с.

20. Кузнецов Р.А. Уточнение понятий «цифровизация» и «цифровая среда» в контексте межпоколенческих связей // Актуальные вопросы гуманитарных и социальных наук. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / гл. редактор Ж.В. Мурзина. Чебоксары, 2022. С. 37–39.

21. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.М. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2003. 308 с.

22. Меланьина М.В., Ахмед НаDIR, Пономарева В.С. Теоретические подходы к определению понятий «цифровая экономика» и «цифровизация» // Горизонты экономики. 2022, № 5 (71). С. 82–87.

23. Мещерякова Н.Н., Роготнева Е.Н. Цифровизация: новые риски для людей с инвалидностью. Постановка проблемы // Цифровая социология. 2021, № 4 (3). С. 44–52. DOI: 10.26425/2658-347X-2021-4-3-44-52

24. Набиева Н.Ю., Симаева Н.П. Цифровизация: понятие и особенности // Форум молодых ученых. 2022, № 3 (67). С. 115–118.

25. Никулина Т.В., Стариченко Е.Б. Информатизация и цифровизация образования: понятия, технологии, управление // Педагогическое образование в России. 2018. № 8. С. 107–113.

26. Ниязова Ю.М. Цифровая трансформация: общая характеристика и ее особенности в вузе // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2019. № 5 (51). С. 70–75.
27. Орлов М.А., Северухин В.А. Понятия автоматизации, алгоритмизации, механизации и цифровизации в праве // Юриспруденция 2.0: новый взгляд на право. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции с международным участием. М.: Российский университет дружбы народов (РУДН). 2020. С. 144–150.
28. Рузина Е.И. Цифровизация: об определении понятия, о выгодах и рисках цифровой трансформации // Горизонты экономики. 2022, № 5 (71). С. 96–99.
29. Савельев И.И., Абдуллаев Н.В. Цифровая экономика и цифровизация: понятие, сущность, значение // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 2, № 11. С. 13–18.
30. Тенденции развития информационного общества в Российской Федерации – 2020: краткий статистический сборник / Федеральная служба государственной статистики; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2020. 220 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oOpt4XM9/info-ob_reg2020.pdf.
31. Толковый словарь по информационному обществу и новой экономике. URL: <https://1246.slovaronline.com>.
32. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919>.
33. Фомичева Т.В., Катаева В.И. Ценности россиян в контексте цифровой российской экономики // Уровень жизни населения регионов России. 2019. № 2. С. 80–84.
34. Цветкова А.В. Цифровизация и ее влияние на российскую экономику: понятие, преимущества и последствия // Инновационное развитие экономики: тенденции и перспективы. 2020. Т. 1. С. 15–24.
35. Цифровая экономика: 2023: краткий статистический сборник / Г.И. Абдрахманова, С.А. Васильковский, К.О. Вишневецкий и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2023. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/802513326.pdf>.
36. Чернобровкина Е.Д. Обзор понятия цифровизация, цифровые технологии и цифровая трансформация // Лазаревские чтения. Материалы XX международной научной конференции. Севастополь, 2022. С. 173–174.
37. Эмирова Э.С., Ветеранова Д.С., Бекирова Э.А. Анализ понятия «цифровизация» на примере образовательной и экономической сфер // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021, № 4 (74). С. 230–235. DOI: 10.34771/UZCEPU.2021.4.74.048
38. Bloomberg Innovation Index. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-18/germany-breaks-korea-s-six-year-streak-as-most-innovative-nation>.
39. IMD World Competitiveness Center. World Competitiveness Rankings (Competitiveness, Digital Competitiveness and Talent). URL: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/#Mission-Publication-Dates>.
40. Gartner Glossary. Information Technology. URL: <https://www.gartner.com/en/glossary/all-terms>.
41. Global Innovation Index 2022. What is the future of innovationdriven growth? Geneva: World Intellectual Property Organization (WIPO). 2022. 15th Edition. DOI: 10.34667/tind.46596. URL: <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-2000-2022-en-main-report-global-innovation-index-2022-15th-edition.pdf>.
42. Gobble M.-A.M. Digital strategy and digital transformation // Research-Technology Management. 2018. Vol. 61, no. 5. P. 66–71.

References

1. Bazarov A.A., Surkov A.N. [Entrepreneurship and digitalization: understanding the differences between the concepts of “virtual”, “digital”, “information” as the basis for the development of entrepreneurial relations]. In: *Collection of the All-Russian Scientific Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates. The concept of private law development: a strategy for the future*; 2020. P. 297–302. (In Russ.)

2. Bessonov N.K. [Legal aspects of the concept of digitalization in Russia]. *Scientific and practical electronic journal Alley of Science*. 2019;12(39). (In Russ.) Available at: <https://alley-science.ru>.
3. Bostanova L.K., Shamanova A., Tebueva D. About digitization. *Actual scientific research in the modern world*. 2020;12-11(80):286–291. (In Russ.)
4. Voronenko D.V., Ivanova I.K. [The concept and elements of digitalization of the economy]. In: *Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Conference. Innovative potential for the development of society: the view of young scientists*; 2021. Vol. 1. P. 63–65. (In Russ.)
5. Danilova L.N., Ledovskaya T.V., Solynin N.E., Khodyrev A.M. The main approaches to understanding digitalisation and digital values. *Bulletin of the Kostroma State University. Series: Pedagogy. Psychology. Sociokinetics*. 2020;6(2):5–12. (In Russ.) DOI: 10.34216/2073-1426-2020-26-2-5-12
6. Dneprovskaya N.V. Assessment of the readiness of the Russian higher education for the digital economy. *Statistics and Economics*. 2018;15(4):16–28. (In Russ.) DOI: 10.21686/2500-3925-2018-4-16-28
7. Ivanova I.K., Boikova E.V. [Digitalization of the economy: concepts and elements]. In: *Economic growth as a basis for sustainable development in Russia. Collection of scientific articles by participants of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kursk; 2022. P. 104–107. (In Russ.)
8. Index “Digital Russia”: Reflection of the digitalization of subjects through the prism of open sources. Author's methodology, taking into account Russian specifics and best practices. The results of measuring the Digital Russia index for the constituent entities of the Russian Federation in 2018. Moscow: School of Management “Skokovo”. (In Russ.) Available at: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Report_Full_2019-04_ru.pdf.
9. Abdrakhmanova G.I., Vasil'kovskiy S.A., Vishnevskiy K.O., Gokhberg L.M. et al. *Indicators of the digital economy: 2022: statistical collection*. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2023. 332 p. (In Russ.) Available at: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/780810055.pdf>.
10. *Information society in the Russian Federation – 2020: statistical collection*. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2020. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/lqv3T0Rk/info-ob2020.pdf>.
11. Karpunina E.K. Transformation as way of economical system development. *Tambov university review. Series: Humanities*. 2011;4(96):27–35. (In Russ.)
12. Map of words and expressions of the Russian language. (In Russ.) Available at: <https://kartaslov.ru>.
13. Katrin E.V. “Digitalization”: on approaches to defining a definition in political science. *Bulletin of ZabGU. Politology*. 2022;28(5):49–54. (In Russ.) DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-5-49-54
14. Kovalev S.D., Kurysev K.N. On the question of the content of the concepts of “digitalization”, “digital transformation”. In: *Actual problems of public law*. Vladimir; 2022. Iss. 16. P. 131–135. (In Russ.)
15. Konkov A.E. Digital politics vs political digitalization. *Vestnik of Saint Petersburg University. International Relations*. 2020;13(1):47–68. (In Russ.) DOI: 10.21638/spbu06.2020.104
16. Korobko O.S. [The concept and essence of digitalization of education]. In: *Educational process at the university in the context of digitalization. Materials of the international scientific-practical conference*. Omsk; 2022. P. 6–12. (In Russ.)
17. Kropotova N.V. Digitalization of higher education: concept and possible risks. *January Pedagogical Readings*. 2021;7(19):25–30. (In Russ.)
18. Kudryavtseva T.Yu., Kozhina K.S. Basic concepts of digitalization. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2021;44(3):149–151. (In Russ.) DOI: 1024412/2304-6139-2022-11228
19. Kudryashov V.S., Alekseev M.V., Ivanov A.V., Gaidin A.A. [Introduction to professional activity]. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies; 2015. 155 p. (In Russ.)
20. Kuznetsov R.A. [Clarification of the concepts of “digitalization” and “digital environment” in the context of intergenerational relations]. In: *Actual issues of the humanities and social sciences. Materials of the II All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Cheboksary; 2022. P. 37–39. (In Russ.)
21. Lazareva T.Ya., Martemyanov Yu.M. [Fundamentals of the theory of automatic control]. Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University; 2003. 308 p. (In Russ.)

22. Melanina M.V., Ahmad Nadir, Ponomareva V.S. Theoretical approaches to the definition of the concepts of “digital economy” and “digitalization”. *Horizons of economics*. 2022;5(71):82–87. (In Russ.)
23. Meshcheryakova N.N., Rogotneva E.N. Digitalization: new risks for people with disabilities. Problem statement. *Digital sociology*. 2021;4(3):44–52. (In Russ.) DOI: 10.26425/2658-347X-2021-4-3-44-52
24. Nabieva N.Yu., Simaeva N.P. Digitalization: concept and features. *Forum of young scientists*. 2022;3(67):115–118. (In Russ.)
25. Nikulina T.V., Starichenko E.B. Information and digital technologies in education: concepts, technologies, management. *Pedagogical education in Russia*. 2018;8:107–113. (In Russ.)
26. Niyazova Yu.M. Digital transformation: general characteristics and its features at the university. *Information and economic aspects of standardization and technical regulation*. 2019;5(51):70–75. (In Russ.)
27. Orlov M.A., Severukhin V.A. [The concepts of automation, algorithmization, mechanization and digitalization in law]. In: *Jurisprudence 2.0: a new look at law. Collection of materials of the inter-university scientific-practical conference with international participation*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia (PFUR); 2020. P. 144–150. (In Russ.)
28. Ruzina E.I. Digitalization: on the definition of the concept, on the benefits and risks of digital transformation. *Horizons of economics*. 2022;5(71):96–99. (In Russ.)
29. Savelev I.I., Abdullaev N.V. Digital economics and digitalization: concept, essence, value. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2018;2(11):13–18. (In Russ.)
30. *Trends in the development of the information society in the Russian Federation – 2020: a brief statistical compendium*. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2020. 220 p. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oOpt4XM9/info-ob_reg2020.pdf.
31. *Dictionary of the information society and the new economy*. (In Russ.) Available at: <https://1246.slovaronline.com>.
32. *Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017 No. 203 “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030”*. (In Russ.) Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919>.
33. Fomichyova T.V., Katayeva V.I. Russian Values in the Context of Digitalization of the Russian Economy. *Living Standards and Quality of Life*. 2019;2:80–84. (In Russ.)
34. Tsvetkova A.V. Digitalization and its impact on the Russian economy: concept, advantages and consequences. *Innovative development of the economy: trends and prospects*. 2020;1:15–24. (In Russ.)
35. *Digital economy: 2023: a brief statistical collection*. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2023. (In Russ.) Available at: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/802513326.pdf>.
36. Chernobrovkina E.D. [Overview of the concept of digitalization, digital technologies and digital transformation]. In: *Lazarevsky Readings. Proceedings of the XX international scientific conference*. Sevastopol; 2022. P. 173–174. (In Russ.)
37. Emirova E.S., Veteranova D.S., Bekirova E.A. Analysis of the concept of “digitalization” on the example of the educational and economic spheres. *Scientific notes of the Crimean engineering and pedagogical university*. 2021;4(74):230–235. (In Russ.) DOI: 10.34771/UZCEPU.2021.4.74.048
38. *Bloomberg Innovation Index*. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-18/germany-breaks-korea-s-six-year-streak-as-most-innovative-nation>.
39. *IMD World Competitiveness Center. World Competitiveness Rankings (Competitiveness, Digital Competitiveness and Talent)*. Available at: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/#Mission-Publication-Dates>.
40. *Gartner Glossary. information technology*. Available at: <https://www.gartner.com/en/glossary/all-terms>.
41. *Global Innovation Index 2022. What is the future of innovation driven growth? Geneva: World Intellectual Property Organization (WIPO)*. 2022. 15th edition. DOI: 10.34667/tind.46596. Available at: <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-2000-2022-en-main-report-global-innovation-index-2022-15th-edition.pdf>.
42. Gobble M.-A.M. Digital strategy and digital transformation. *Research-Technology Management*. 2018;61(5):66–71.

Информация об авторах

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Голлай Ирина Николаевна, магистрант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gollaiin@susu.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; loginovskiiov@susu.ru.

Information about the authors

Alexander V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk; Russia; alexander@hollay.ru.

Irina N. Gollay, Master Student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gollaiin@susu.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; loginovskiiov@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 10.02.2023

The article was submitted 10.02.2023

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья

УДК 681.5.011 + 532.5 + 533.6.011.12

DOI: 10.14529/ctcr230207

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГРУППЫ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ В ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

С.И. Кускарбекова, sulpan.kuskarbekova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

Н.М. Максимов, maksimov.nik275@gmail.com

К.В. Осинцев, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Модернизация систем автоматического управления электрических устройств играет важную роль с точки зрения энергоэффективности и энергосбережения при эксплуатации тепло-энергетических установок. Разработка учебного лабораторного стенда, который имитирует работу прямоточного парового котла змеевикового типа в составе транспортабельной котельной установки, позволила внедрить систему автоматического управления питательным насосом с помощью внедрения контроллера, частотного привода и управления устройством посредством программы SCADA. На основе экспериментальных данных в результате работы учебного лабораторного стенда предложена идея по созданию автоматизированной системы управления группой питательных насосов для прямоточных паровых котлов змеевикового типа, которые эксплуатируются в составе транспортабельной котельной установки на нефтепромысловой площадке. Данная установка и котельный агрегат приняты за базовые модели при проектировании учебного лабораторного стенда. **Цель работы** заключается в создании схемы автоматизации группы насосов транспортабельной котельной установки, используя экспериментальные данные с учебного лабораторного стенда, а также приняв во внимание теоретическую и практическую составляющую по применению автоматизации всей или части группы питательных насосов с точки зрения энергоэффективности и энергосбережения. **Материалы и методы** содержат информацию о создании и адаптации математической модели для описания работы насосов с учетом гидравлических сопротивлений, которые возникают за счет змеевиков котла – навитых труб сложной формы в виде коаксиального цилиндра. **Результаты работы** отражены в виде алгоритмической структурной схемы блока насоса и принципиальной схемы автоматизации группы насосов котельной установки. В ходе работы предложен перечень оборудования для модернизации системы управления блоком питательных насосов. В **заключении** рассмотрены перспективы дальнейшей разработки в данной области, приведены преимущества разделения насосов на подгруппы, такие как основные – регулируемые и вспомогательные – нерегулируемые, а также положительные аспекты в использовании частотного регулирования для основных насосов в составе эксплуатируемой котельной установки.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер, электропривод, SCADA, АСУ ТП, прямоточные котлы

Для цитирования: Кускарбекова С.И., Максимов Н.М., Осинцев К.В. Автоматизация группы питательных насосов в транспортабельной котельной установке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 82–92. DOI: 10.14529/ctcr230207

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230207

AUTOMATION OF A GROUP OF FEED PUMPS IN A TRANSPORTABLE BOILER PLANT

S.I. Kuskarbekova, sulpan.kuskarbekova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

N.M. Maksimov, maksimov.nik275@gmail.com

K.V. Osintsev, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Modernization of automatic control systems of electrical devices plays an important role in terms of energy efficiency and energy saving in the operation of thermal power plants. The development of an educational laboratory stand, which simulates the operation of a direct-flow steam boiler of a coil type as part of a transportable boiler plant, allowed the introduction of an automatic control system for a feed pump with the help of the introduction of a controller, a frequency drive and control of the device through the SCADA program. Using experimental data as a result of the work of the educational laboratory stand, the idea of creating an automated control system for a group of feed pumps for direct-flow steam boilers of the coil type, which are operated as part of a transport boiler plant at an oilfield site, is proposed. This installation and boiler unit are taken as basic models when designing a training laboratory stand. **The purpose of the work** is to create an automation scheme for a group of pumps of a transportable boiler plant, using experimental data from an educational laboratory stand, as well as taking into account the theoretical and practical component for the use of automation of all or part of a group of feed pumps from the point of view of energy efficiency and energy saving. **Materials and methods** contain information on the creation and adaptation of a mathematical model to describe the operation of pumps, taking into account hydraulic resistances that arise due to boiler coils – wound pipes of complex shape in the form of a coaxial cylinder. **The results of the work** are reflected in the form of an algorithmic block diagram of the pump unit and a schematic diagram of the automation of a group of pumps of a boiler plant. In the course of the work, a list of equipment for upgrading the control system of the feed pump unit was proposed. **In conclusion**, the prospects for further development in this area are considered, the advantages of dividing pumps into subgroups are given, such as the main – regulated and auxiliary – unregulated, as well as positive aspects in the use of frequency control for the main pumps as part of the operated boiler plant.

Keywords: programmable logic controller, electric drive, SCADA, automated process control system, direct-flow boilers

For citation: Kuskarbekova S.I., Maksimov N.M., Osintsev K.V. Automation of a group of feed pumps in a transportable boiler plant. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):82–92. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230207

Введение

Транспортабельная котельная установка (далее по тексту – ТКУ) на базе паровых прямоточных котлов змеевикового типа эксплуатируется на северном месторождении Варь-Еган. Во время режимно-наладочных испытаний и сезонной работы возникла необходимость в модернизации системы управления группы питательных насосов.

Группа питательных насосов отвечает за подачу химически очищенной воды в паровые прямоточные котлы змеевикового типа [1]. В котлах данного типа из-за конструктивных особенностей возникает высокое гидравлическое сопротивление [2]. Во время работы оператор паровых котлов обязан следить за стабильной работой котлов и за давлением, создаваемым насосами. На данный момент в существующей транспортабельной котельной установке управление подобными насосами осуществляется с помощью базовой автоматизации, которая заключается во включении или отключении насосов, изменении частоты двигателя с помощью потенциометра [3]. Это неэффективно из-за отсутствия на панели управления информации об оборотах двигателя в зависимости от нагрузки и защитных функций по нескольким параметрам [4].

Группа питательных насосов включает в себя 4 насоса по 2 на каждый котел. Каждая подгруппа подключена последовательно к каждому котлу для поддержания стабильного напора (рис. 1).

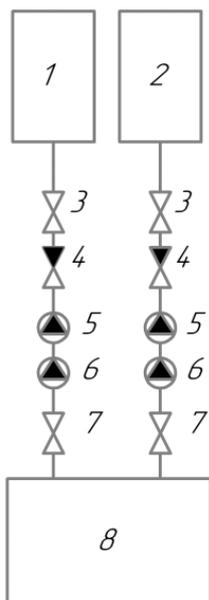


Рис. 1. Часть принципиальной схемы ТКУ:
1, 2 – паровой котел; 3, 7 – запорная арматура;
4 – обратный клапан; 5, 6 – питательные насосы;
8 – питательная емкость

Fig. 1. Part of the schematic diagram of the boiler plant: 1, 2 – steam boiler; 3, 7 – shut-off valves; 4 – return valve; 5, 6 – feed pumps; 8 – feed tank

По опытным данным, полученным во время эксплуатации котельной в реальных условиях, был создан учебный лабораторный стенд, который имитирует работу прямоточного парового котла змеевикового типа (рис. 2) [5].

В состав основного оборудования стенда входит насос, расходомер, вентилятор и датчики давления. Стенд автоматизирован (рис. 3). Шкаф управления состоит из следующего оборудования: программируемый логический контроллер (далее по тексту – ПЛК), частотный привод и вспомогательное оборудование. ПЛК подключается к компьютеру, на котором установлена программа SCADA. С помощью нее управляющий стендом может запускать, отключать и менять режимы работы основного оборудования с виртуального рабочего стола на компьютере (далее по тексту – ПК).

Программа также сигнализирует о превышении параметров: обороты двигателя, давление в змеевике. После предупреждения двигатель насоса отключается в безопасном режиме. Основное электрическое оборудование также защищено от перепадов напряжения с помощью реле. Все параметры записываются и сохраняются в электронном виде.



Рис. 2. Фото лабораторного стенда
Fig. 2. Photo of the laboratory stand



Рис. 3. Фото шкафа управления лабораторного стенда
Fig. 3. Photo of the control cabinet of the laboratory stand

Автоматическая система управления стендом показала хорошие результаты во время экспериментов: постоянная связь контроллера с ПК, реагирование на внесенные параметры с минимальным промежутком времени, сохранение всей информации в электронном журнале в режиме

онлайн и простота интерфейса. Удобство в изменении параметров гидравлической системы на удаленном расстоянии позволило оценить перспективы разработки подобного управления для котельной. Плавное изменение характеристик двигателей насосов позволит снизить потребление электроэнергии, откроет возможности в регулировании работы котлов в соответствии с режимными картами в более точном диапазоне, что скажется на расходе топлива и увеличении энергоэффективности котельной в целом [6].

Процесс регулирования группы питательных насосов представляет собой несколько вариаций: параллельное включение регулируемых и нерегулируемых насосов, работа полностью регулируемых или нерегулируемых групп. Существуют исследования по параллельной работе регулируемого и нерегулируемого насосных агрегатов, об эффективности применения частотного привода, что отмечено в работах Р.С. Новикова, В.Е. Прокофьева, К.В. Яновича [7]. Вопросы эксплуатации частотно-регулируемого привода в промышленности, использование контроллера, выявленные положительные аспекты опытного исследования в области энергосбережения раскрывают в своей работе Химани Праджапати, Свапнил Арья, Джейдипсин Бария [8]. Научные труды А.А. Прокопова, Р.А. Кахорова, В.А. Новикова, М.П. Белова содержат разработки базы математических моделей компонентов электроприводных систем насосных агрегатов, которые могут быть использованы для оптимизации системы управления данных устройств [9]. Однако в работах приведены общие решения, без учета особенностей сопротивлений со стороны потребителей после насосов, что влияет на динамические и энергетические характеристики насосной группы. Исследование гидравлических сопротивлений в каналах разной формы представлено в работах Бастьяна Раппа [10], Н.А. Войнова, Д.А. Земцова, А.В. Богатковой, Н.В. Дерягины [11]. В рассматриваемом случае в котельной установке большое сопротивление по гидравлической системе возникнет со стороны котлов, так как змеевики парового агрегата представляют собой навитые трубы в форме коаксиального цилиндра. Таким образом, системы автоматического регулирования группой насосов в транспортабельной котельной установке требуют совершенствования.

Теоретическая часть

Для определения расхода в момент времени необходимо руководствоваться базовой формулой о давлении:

$$p = \rho \cdot g \cdot H_i, \quad (1)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H_i – напор, м.

Если рассматривать напорную характеристику насоса, который работает с изменяющейся частотой вращения рабочего колеса, то уместна формула [9]:

$$p_i = p_0 \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 - \frac{p_0 - p_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2} \cdot Q_i^2, \quad (2)$$

где p_0 – давление насоса холостого хода, МПа;

$p_{\text{ном}}$ – номинальное давление насоса, МПа;

ω_i – текущая скорость рабочего колеса на выходе из насоса, об/мин;

$\omega_{\text{ном}}$ – номинальная скорость рабочего колеса на выходе из насоса, об/мин;

$Q_{\text{ном}}$ – номинальная подача насоса, м³/с;

Q_i – текущая подача насоса, м³/с;

$$R_n = \frac{p_0 - p_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2} \text{ – принять как гидравлическое сопротивление насоса.}$$

Первое слагаемое уравнения (2) можно выразить в виде формулы как давление холостого хода при любой скорости вращения рабочего колеса насоса:

$$p_0 \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = k_{p_0} \cdot \omega_i^2. \quad (3)$$

Если рассматривать коаксиальные змеевики прямооточного парового котла как самое большое сопротивление для работы насоса, то можно выразить характеристику сети:

$$p_c = p_{\Pi} + \frac{p_{\text{ном}} - p_{\Pi}}{Q_{\text{ном}}^2} \cdot \xi \cdot Q_3^2, \quad (4)$$

где p_{Π} – противодавление, которое обусловлено в данном случае из-за разности геодезических высот между питательным баком и насосами, МПа;

Q_3 – расход в змеевиках прямооточного парового котла, м³/с.

$R_3 = \frac{p_{\text{ном}} - p_{\Pi}}{Q_{\text{ном}}^2}$ – принять как гидравлическое сопротивление змеевиков котла;

ξ – коэффициент сопротивления змеевика в местах изгиба, адаптированный впервые для прямооточного парового котла змеевикового типа.

Решая совместно уравнения (1), (2) и (4), можно получить расход теплоносителя без учета временной характеристики:

$$Q_i = Q_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}}\right)^2 - \frac{p_i}{p_0}}{1 - \frac{p_{\Pi}}{p_0}}}. \quad (5)$$

Если внедрить в уравнение (5) время и выразить для прямооточного парового котла змеевикового типа, то оно примет вид:

$$\frac{dQ_i}{d\tau} = \left(\frac{s}{\rho \cdot L}\right) \cdot [p_1 + p_0 - p_c - (R_{\Sigma}) \cdot Q_i^2], \quad (6)$$

где τ – время;

s – сечение трубопровода, м²;

L – длина трубопровода, м;

p_1 – давление на всасе трубопровода насоса, МПа;

R_{Σ} – сумма гидравлических сопротивлений.

Для решения поставленных задач рассматривается осуществление системы автоматического регулирования насосной группы. Каждое устройство может быть изображено в виде единичной динамической системы из структурной схемы (рис. 4).

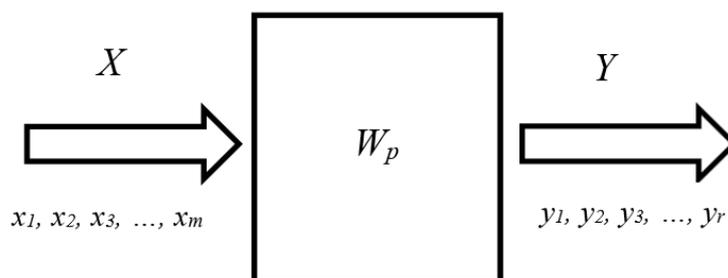


Рис. 4. Представление переменных динамического звена
Fig. 4. Representation of dynamic link variables

Данное звено описывается уравнением Лапласа, где передаточная функция W_p может быть выражена уравнением [12]:

$$W_p = \frac{y(p)}{x(p)}, \quad (7)$$

где x и y – входная и выходная переменные.

Зная переходную характеристику (8), которая обусловлена единичным воздействием на звено (9), можно судить о динамических свойствах системы (10), применяя преобразования Лапласа:

$$y = h(t); \tag{8}$$

$$x(t) = \begin{cases} 0, t < 0; \\ 1, t \geq 0; \end{cases} \tag{9}$$

$$x(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot dt = \frac{1}{p}; \quad h(p) = \frac{W_p}{p}; \quad h(t) \div \frac{W_p}{p}. \tag{10}$$

Таким образом, возможно вычисление реакции передаточной функции на данное единичное воздействие.

Учитывая вышесказанное, схему модуля компонента – насоса – можно изобразить в виде рис. 5.



Рис. 5. Схема модуля компонента
Fig. 5. Component module diagram

Изменение частоты вращения рабочего колеса насосного агрегата приводит к изменению всех его рабочих характеристик.

Алгоритмическая структурная схема работы насоса представлена на рис. 6.

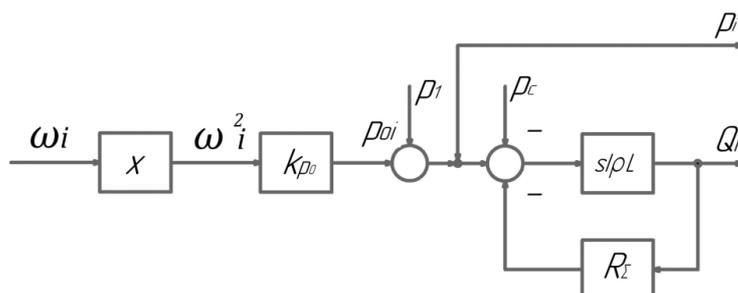


Рис. 6. Алгоритмическая структурная схема блока насосной группы
Fig. 6. Algorithmic block diagram of the pump group unit

Практическая часть

Проанализировав работу лабораторного стенда и ТКУ при рабочих условиях, выявили, что можно принять насосы 5 (см. рис. 1) основными, а 6 – вспомогательными в соответствии с нагрузкой при работе котлов. Используя представленные теоретические выражения, данная теория предложена с целью защиты оборудования от постоянных перепадов напряжения и снижения загруженности питающей сети (рис. 7), которые часто происходят на объектах, а также экономии капитальных затрат на оборудование, решение об установке частотно-регулируемого электропривода в роли основной пары питательных насосов, в качестве вспомогательных – неуправляемый электропривод, получающий питание напрямую от питающей сети.

Управление частотно-регулируемым приводом будет осуществляться с помощью частотного преобразователя соединенным с ПЛК путем задания необходимой частоты вращения вала двигателя для поддержания необходимого давления в системе. Информация о состоянии давления в каждом из котлов будет поступать от датчиков давления, установленных на входе котлов. В случае, если необходимое давление в одном из котлов не обеспечивается основным насосом, в работу включается вспомогательный насос с помощью магнитного пускателя после подачи на его катушку сигнала управления. Условием включения вспомогательного насоса является превышение установленного значения тока статора основного насоса. После того как вспомогательный насос выходит на номинальный режим работы, происходит регуляция выходной частоты вращения основного насоса. Для защиты вспомогательных насосов предусмотрена установка теплового реле и автоматический выключатель. Таким образом осуществляется регулирование давления на паровых котлах.

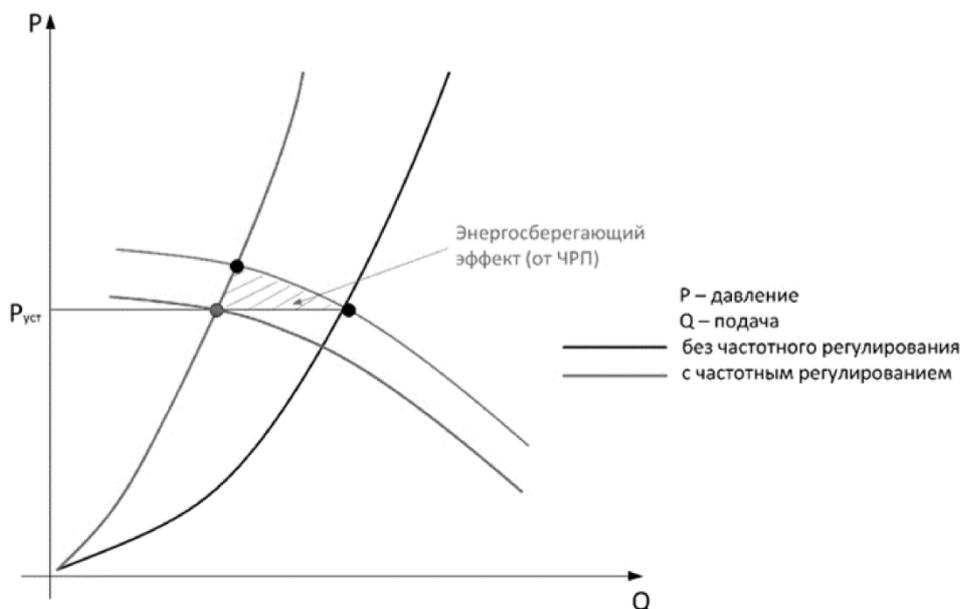


Рис. 7. Зависимость подачи от давления с частотным и без частотного регулирования
Fig. 7. Dependence of supply on pressure with frequency and without private regulation

Необходимо внедрить в схему расходомер для измерения количества проходящего теплоносителя через оба котла путем его установки в общую линию сразу после питательной емкости 8 (см. рис. 1), которая после будет разветвляться после на два потока для двух котлов соответственно.

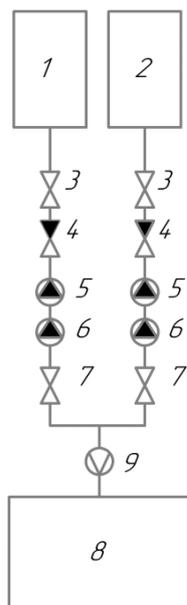


Рис. 8. Часть принципиальной схемы ТКУ:
1, 2 – паровой котел; 3, 7 – запорная арматура;
4 – обратный клапан; 5, 6 – питательные насосы;
8 – питательная емкость; 9 – расходомер
Fig. 8. Part of the schematic diagram of the boiler
plant: 1, 2 – steam boiler; 3, 7 – shut-off valves;
4 – check valve; 5, 6 – feed pumps; 8 – feed tank;
9 – flow meter

В соответствии с вышесказанным поставлены следующие задачи для создания автоматизации системы управления группой питательных насосов в ТКУ [13]:

- 1) создание единой панели управления, которая будет включать верхний и нижний уровни: включение и отключение плановое, задание количества оборотов, сигнализацию и отключение аварийное при превышении параметров (по скорости двигателя);
- 2) регулирование текущих параметров с записью в виртуальный журнал на компьютере;
- 3) переключение работы каждого насоса и подгрупп;
- 4) автоматическое изменение оборотов двигателя насоса в зависимости от необходимой нагрузки на котлы.

На основании поставленных задач можно выделить следующие основные узлы в цепи управления на начальной стадии проектирования [14]:

- 1) узел включения и отключения;
- 2) узел пуска;
- 3) узел торможения;
- 4) узел защиты;
- 5) узел автоматического технологического процесса.

Оборудование, входящее в перечисленные узлы: частотный преобразователь, ПЛК, электромагнитный пускатель, тепловое реле, автоматические выключатели, датчики давления, расходомер, преобразователь напряжения. На рис. 8 представлена часть принципиальной схемы ТКУ после внедрения расходомера, а на рис. 9 изображена принципиальная схема автоматизации группы насосов транспортабельной котельной установки.

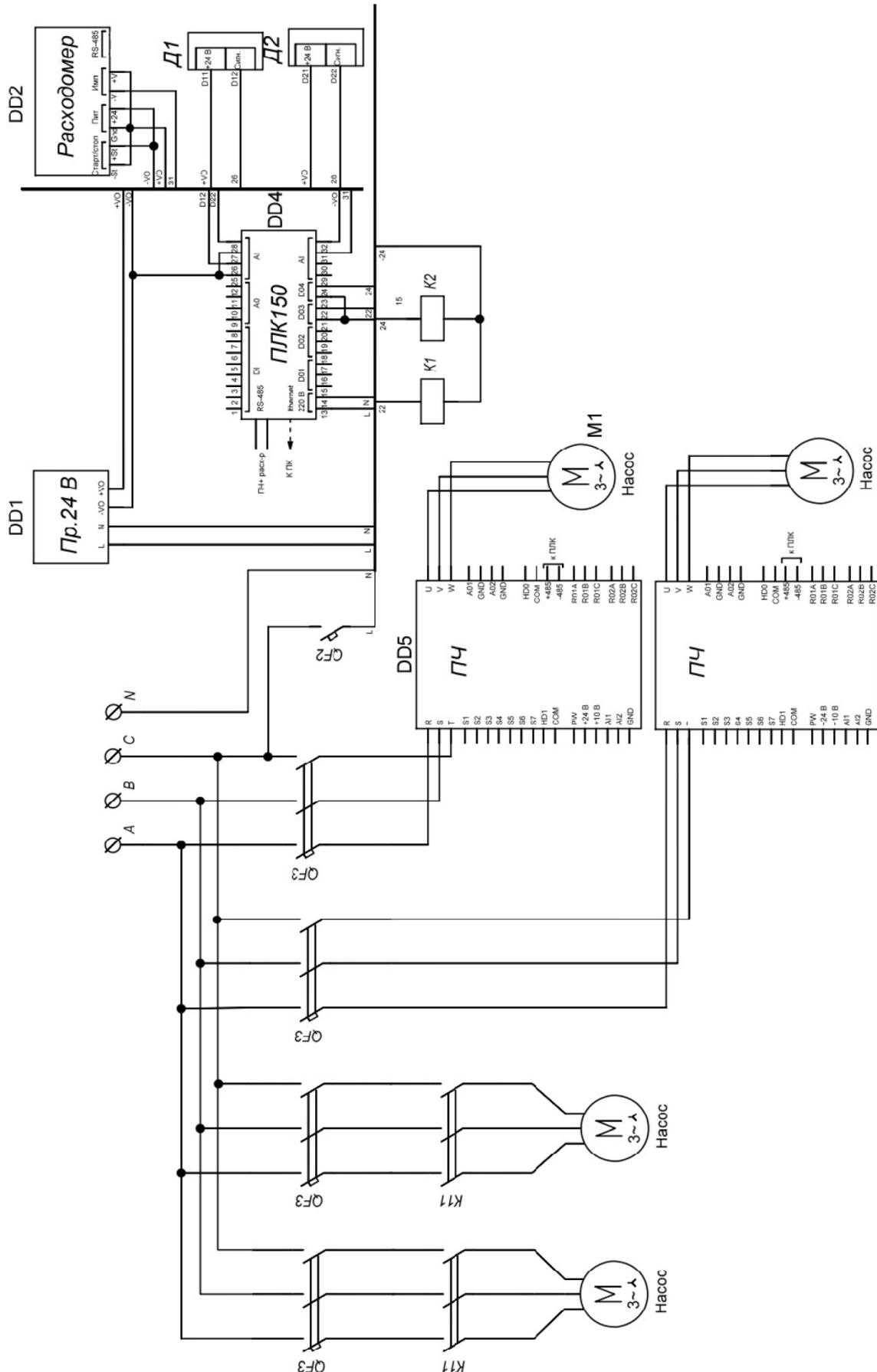


Рис. 9. Принципиальная схема автоматизации группы насосов ТКУ
Fig. 9. Schematic diagram of automation of a group of pumps of a boiler plant

Использование ПЛК в данной схеме обусловлено функциональными возможностями [15]:

- 1) легкость в управлении через компьютер с человеко-машинным интерфейсом;
- 2) увеличение надежности системы автоматизации;
- 3) моментальное реагирование при изменении состояния системы и параметров.

Динамическое торможение осуществляется по принципу скорости – в зависимости от скорости двигателя.

Заключение

Таким образом, на основе опыта проектирования, автоматизации и управления лабораторным стендом, который имитирует работу прямооточного парового котла змеевикового типа, была предложена схема автоматического управления группой питательных насосов для транспортно-котельной установки, в которой эксплуатируются подобные котлы.

Математическая модель адаптирована для насосов, которые работают с большим гидравлическим сопротивлением со стороны змеевиковых элементов. С помощью уравнений Лапласа возможно вычисление реакции передаточной функции на данное единичное воздействие. Также в работе получена алгоритмическая структурная схема блока насосной группы. Аналогично можно рассмотреть и для других блоков алгоритмические структурные схемы, которые могут описывать динамические и энергетические характеристики в системе управления группой насосов, а впоследствии формирующие полный процесс управления.

Представленная принципиальная схема автоматизации группы насосов ТКУ включает в себя только частотное регулирование основных насосов, давления на входе, а также расход теплоносителя. Управление возможно осуществлять с помощью ПК через виртуальный стол в программе SCADA. Деление насосов на регулируемые и нерегулируемые позволит снизить затраты на капитальные вложения, получить наилучший эффект по энергосбережению, а также повысить эффективность использования основного и вспомогательного оборудования котельной установки.

Список литературы

1. Dyakonov E., Mikhailov V., Usikov N. Design of boiler plants (past, present and possible future) // American scientific journal. 2020. Vol. 1, no. 43. P. 51–55. DOI: 10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.52
2. Малахов А.В., Савиных И.А. Конструктивно-технологические особенности и комплектация блочно-модульных котельных установок // Транспортные системы. 2017. № 2 (5). С. 60–64. DOI: 10.46960/62045_2017_2_60
3. Дудкин М.М., Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Опытное исследование работы парового котла змеевикового типа при эксплуатации на северном нефтяном месторождении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 4. С. 14–25. DOI: 10.14529/power190402
4. Кауанов А.С., Паршина Г.И., Сичкаренко А.В. Разработка методики исследования работы насосных установок на базе стенда-имитатора // Вестник ТоU: Энергетическая серия. 2021. № 1. С. 152–162. DOI: 10.48081/TFDT5813
5. Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Разработка автоматизированной системы управления для учебного лабораторного стенда // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 141–150. DOI: 10.14529/ctcr220313
6. Регулирование нагрузки и обеспечение экономичности паровых котлов с экстремальным регулятором / В.Р. Сабанин, В.И. Кормилицын, В.И. Костык и др. // Теплоэнергетика. 2014. № 12. С. 63–69. DOI: 10.1134/S0040363614110071
7. Новиков Р.С., Прокофьев В.Е., Янович К.В. Параллельная работа регулируемого и нерегулируемого насосных агрегатов // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 6 (7). С. 175–184.
8. Prajapati Himani, Arya Swapnil, Baria Jaydeepsinh C. Variable Frequency Drive // Advances in Power Generation from Renewable Energy Sources (APGRES). SSRN Electronic Journal. 2019. DOI: 10.2139/ssrn.3442439
9. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций / А.А. Прокопов, Р.А. Кахоров, В.А. Новиков, М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017;10:44–54.

10. Rapp Bastian E. Chapter 17 – Hydraulic Resistance // *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. Elsevier, 2017. P. 351–370. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3141-1.50017-4
11. Study of hydraulic resistance of tangential swirlers / N.A. Voinov, D.A. Zemtsov, A.V. Bogatkova, N.V. Deryagina // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094 (5). P. 052029. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/5/052029
12. Сафиуллин Р.К. Основы автоматики и автоматизация процессов. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. 187 с.
13. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издат. центр «Академия», 2006. 304 с.
14. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издат. дом МЭИ, 2015. 371 с.
15. Антропов Я.А., Кретов Я.А. Особенности работы и методы регулирования питательных насосов // *Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LXI Междунар. науч.-практ. конф.* 2022. № 6 (56). DOI: 10.32743/2587862X.2022.6.56.342611

References

1. Dyakonov E., Mikhailov V., Usikov N. Design of boiler plants (past, present and possible future). *American scientific journal*. 2020;1(43):51–55. DOI: 10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.52
2. Malakhov A.V., Savinykh I.A. [Design and technological features and equipment of block-modular boiler plants]. *Transportnyye sistemy*. 2017;2(5):60–64. (In Russ.) DOI: 10.46960/62045_2017_2_60
3. Dudkin M.M., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I. Experimental Investigation of Coil Type Steam Generator Performance when Used in North Oil Fields. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2019;19(4):14–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/power190402
4. Kauanov A.S., Parshina G.I., Sichkarenko A.V. Development of methodology for studying the operation of pumping units on the basis of a stand-simulator. *ToU Bulletin: Energy Series*. 2021;1:152–162. (In Russ.) DOI: 10.48081/TFDT5813
5. Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I. Development of an automated control system for an educational laboratory stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3):141–150. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220313.
6. Sabanin V.P., Kormilitsyn V.I., Kostyk V.I., Smirnov N.I., Koroteev A.V., Repin A.I. Load control and the provision of the efficiency of steam boilers equipped with an extremal governor. *Thermal Engineering*. 2014;61(12):905–910. DOI: 10.1134/S004060151411007X
7. Novikov R.S., Prokofev V.E., Yanovich K.V. Parallel operation of regulated and unregulated pumping units. *Actual problems of military scientific research*. 2020;6(7):175–184. (In Russ.)
8. Prajapati Himani, Arya Swapnil, Baria Jaydeepsinh C. Variable Frequency Drive. *Advances in Power Generation from Renewable Energy Sources (APGRES)*. *SSRN Electronic Journal*. 2019. DOI: 10.2139/ssrn.3442439
9. Prokopov A.A., Kakhorov R.A., Novikov V.A., Belov M.P. Mathematical models electric drive systems of pumping units and stations. *Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2017;10:44–54. (In Russ.)
10. Rapp Bastian E. Chapter 17 – Hydraulic Resistance. In: *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. Elsevier; 2017. P. 351–370. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3141-1.50017-4
11. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Bogatkova A.V., Deryagina N.V. Study of hydraulic resistance of tangential swirlers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2094(5):052029. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/5/052029
12. Safiullin R.K. *Osnovy avtomatiki i avtomatizatsiya protsessov* [Fundamentals of automation and process automation]. Kazan: Kazan State University of Architecture and Engineering Publ.; 2013. 187 p. (In Russ.)
13. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow: Publishing Center “Academy”; 2006. 304 p. (In Russ.)
14. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow: Publishing house of MEI; 2015. 371 p. (In Russ.)
15. Antropov Ya.A., Kretov Ya.A. [Features of operation and methods of regulation of feed pumps]. In: *Technical sciences: problems and solutions: collection of articles based on the materials of the LXI International scientific and practical conference*. 2022;6(56). (In Russ.) DOI: 10.32743/2587862X.2022.6.56.342611

Информация об авторах

Кускарбекова Сулпан Приковна, старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

Максимов Никита Максимович, преподаватель кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; maksimov.nik275@gmail.com.

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; osintsev2008@yandex.ru.

Information about the authors

Sulpan I. Kuskarbekova, Senior Lecturer of the Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

Nikita M. Maksimov, Lecturer of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; maksimov.nik275@gmail.com.

Konstantin V. Osintsev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; osintsev2008@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 26.10.2022

The article was submitted 26.10.2022

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 002.5:004
DOI: 10.14529/ctcr230208

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПО КЛАВИАТУРНОМУ ПОЧЕРКУ

Л.А. Артюшина, larisa-artusina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5160-5294>

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия*

Аннотация. Цель исследования: оценка защищенности ИС в процессе идентификации пользователя по клавиатурному почерку. **Материалы и методы.** Изучение и анализ научных публикаций по проблеме оценки защищенности информационных систем позволили выявить наиболее эффективный подход к оценке защищенности информационной системы, основанный на моделировании атак. Метод, рассмотренный в статье, представляет собой комбинацию графического и вероятностного подходов к анализу возможных сценариев реализации угроз в информационных системах для случая идентификации пользователя. Графическое представление в виде деревьев атак мы использовали для моделирования возможных путей атакующих действий нарушителя, связанных между собой в соответствии с тем, в какой последовательности их может выполнять нарушитель. Вероятностный подход в случае идентификации пользователя был использован нами для оценки вероятности успешности атаки на актив по пути, указанному в соответствующем дереве атак, и эффективности предлагаемых контрмер. **Результаты.** Обозначена совокупность наиболее информативных параметров клавиатурного почерка, к которой мы отнесли время нажатия клавиши, паузы между нажатиями клавиш и скорость набора. Для этой совокупности определены возможные сценарии развития событий в процессе идентификации пользователя, а также случаи, когда необходимо принять контрмеры: совпадают все три значения параметра клавиатурного почерка, контрмеры не предусмотрены; совпадают любые два из трех значений параметра клавиатурного почерка, требуется предусмотреть контрмеры; не совпадают два из трех или все три значения параметра клавиатурного почерка, требуется предусмотреть контрмеры. С помощью дерева атак смоделированы возможные варианты путей атак и возможные сценарии развития событий в процессе идентификации пользователя. С использованием вероятностного подхода рассчитаны вероятность успешной атаки на актив по пути, указанному в дереве атак, и степень эффективности предлагаемых контрмер. **Заключение.** Представленный в статье расчет уровня защищенности информационной системы будет полезен разработчикам и исследователям в их практической и научной деятельности.

Ключевые слова: вероятностный подход, защита информации, клавиатурный почерк, деревья атак, оценка защищенности

Для цитирования: Артюшина Л.А. Вероятностный подход к оценке защищенности информационной системы в задаче идентификации пользователя по клавиатурному почерку // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 93–101. DOI: 10.14529/ctcr230208

A PROBABILISTIC APPROACH TO ASSESSING THE SECURITY OF THE INFORMATION SYSTEM IN THE PROBLEM OF USER IDENTIFICATION BY KEYPAD HANDWRITING

L.A. Artyushina, larisa-artusina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5160-5294>

Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. The purpose of the study. Assessment of IP security in the process of user identification by keyboard handwriting. Materials and methods. The study and analysis of scientific publications on the problem of assessing the security of information systems allowed us to identify the most effective approach to assessing the security of an information system based on attack modeling. The method considered in the article is a combination of graphical and probabilistic approaches to the analysis of possible scenarios for the implementation of threats in information systems for the case of user identification. We used a graphical representation in the form of attack trees to model possible ways of attacking actions of the violator, interconnected in accordance with the sequence in which they can be performed by the violator. The probabilistic approach in the case of user identification was used by us to assess the probability of success of an attack on an asset along the path indicated in the corresponding attack tree and the effectiveness of the proposed countermeasures. **Results.** The set of the most informative parameters of keyboard handwriting is indicated, to which we attributed: the time of pressing the key, the pauses between keystrokes and the speed of typing. For this set, possible scenarios for the development of events in the process of user identification are identified, as well as cases when it is necessary to take countermeasures: all three values of the keyboard handwriting parameter coincide, countermeasures are not provided; any two of the three values of the keyboard handwriting parameter are combined, countermeasures must be provided; two of the three or all three values of the keyboard handwriting parameter do not match, it is necessary to provide countermeasures. With the help of the attack tree, possible variants of attack paths and possible scenarios for the development of events in the process of user identification are modeled. Using a probabilistic approach, the probability of a successful attack on an asset along the path indicated in the attack tree and the degree of effectiveness of the proposed countermeasures are calculated. **Conclusion.** The calculation of the security level of the information system presented in the article will be useful to developers and researchers in their practical and scientific activities.

Keywords: probabilistic approach, information protection, keyboard handwriting, attack trees, security assessment

For citation: Artyushina L.A. A probabilistic approach to assessing the security of the information system in the problem of user identification by keypad handwriting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):93–101. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230208

Введение

Задаче повышения уровня защищенности информационных систем (ИС) посвящено большое количество работ. Актуальность проблемы безопасности информации, циркулирующей в ИС, с каждым днем лишь возрастает [1–6].

Для повышения уровня защищенности ИС необходимо регулярно проводить ее оценку и анализ. Полученные результаты позволят оптимизировать управляющие воздействия, механизмы выявления нарушителей и построить адекватную систему защиты информации, циркулирующей в ИС.

Одним из наиболее эффективных подходов к оценке защищенности является подход, основанный на моделировании атак, позволяющий учесть как вероятность осуществления атак определенного типа, так и их успешность.

Одним из представлений, описывающим возможные действия нарушителя, являются деревья атак [1–6]. Узлы дерева атак могут быть представлены как возможные пути атакующих действий

нарушителя, связанные между собой в соответствии с тем, в какой последовательности их может выполнять нарушитель.

Введем необходимые рабочие определения.

Вслед за [7] в рамках тематики статьи под нарушителем будем понимать физическое лицо (субъект), случайно или преднамеренно совершившее действия, следствием которых является нарушение безопасности информации при ее обработке техническими средствами в информационных системах. Под защищенностью ИС – комплекс организационных мер и программно-технических средств защиты от несанкционированного доступа к информации в ИС. Под контрмерами – меры, внедрение которых позволяет снизить вероятность того, что источник угрозы сможет воспользоваться уязвимостью ИС.

Цель работы: оценка защищенности ИС в процессе идентификации пользователя по клавиатурному почерку. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определить:
 - совокупность параметров клавиатурного почерка, которые будут использованы для оценки уровня защищенности ИС;
 - возможные сценарии развития событий в процессе идентификации пользователя, а также случаи, когда необходимо принять контрмеры;
 - возможные варианты путей атак для выбранных ценных активов ИС;
- предусмотреть комплекс контрмер для устранения атак;
- сформировать дерево атак;
- с использованием вероятностного подхода рассчитать:
 - вероятность успешной атаки на актив по пути, указанному в дереве атак;
 - степень эффективности предлагаемых контрмер.

1. Определение совокупности параметров клавиатурного почерка и возможных сценариев атак

Основываясь на результатах анализа научных публикаций по проблеме биометрической идентификации пользователя [8–11], представленных нами в работе [12], к параметрам, обладающим высокой степенью информативности, мы отнесли: время нажатия (p_1), паузы между нажатиями (p_2) и скорость набора (p_3).

Для оценки защищенности ИС в задаче идентификации пользователя мы определили возможные сценарии развития событий в процессе идентификации пользователя, а также случаи, когда необходимо принять контрмеры:

- совпадают все три значения параметра клавиатурного почерка, контрмеры не предусмотрены;
- совпадают любые два из трех значений параметра клавиатурного почерка. Требуется предусмотреть контрмеры;
- не совпадают два из трех или все три значения параметра клавиатурного почерка. Требуется предусмотреть контрмеры.

2. Моделирование путей атак для выбранной совокупности параметров клавиатурного почерка

Процесс моделирования возможных путей атак на активы ИС рассмотрим на примере организации обучения по курсу дисциплины на платформе moodle. В данном случае ценным активом для нарушителя являются информационные ресурсы, а именно Банк заданий и ответов, База данных обучаемых и их оценок.

Цель атаки на актив – получить доступ к информации, ограниченный лишь правами обучаемого (G_0).

Конкретизируем возможные сценарии развития событий в процессе идентификации пользователя.

Цель атаки не может быть достигнута в случаях, если все три значения параметров клавиатурного почерка соответствуют эталону пользователя ($i(p_1;p_2;p_3=true)$).

Цель атаки может быть достигнута в случае выполнения хотя бы одного из следующих усло-

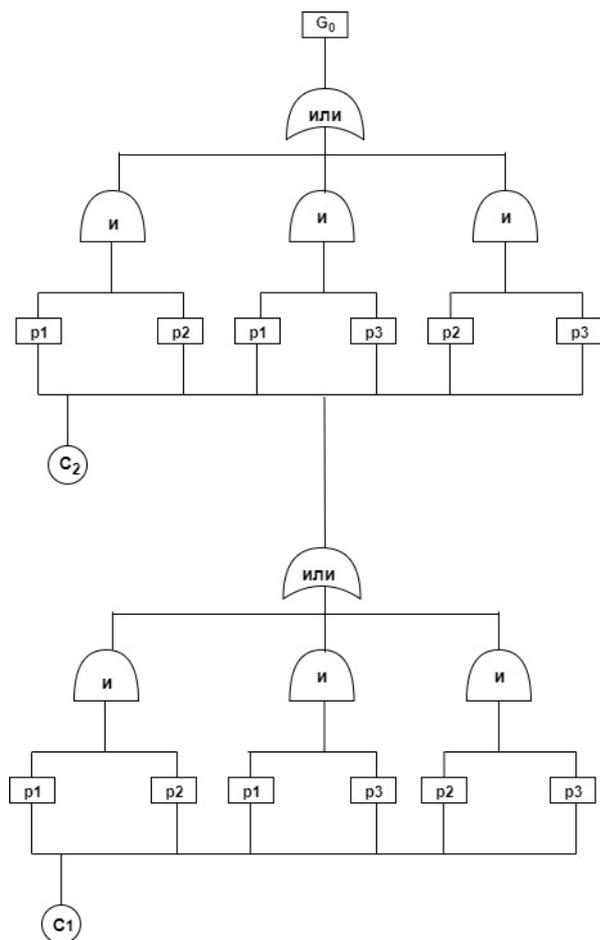


Рис. 1. Дерево атак с контрмерами для идентификации пользователя
Fig. 1. Attack tree with countermeasures for user identification

ки на актив по пути, указанному в соответствующем дереве атак, и эффективности предлагаемых контрмер.

Выделим основное событие (цель атаки – G_0). Варианты атак (базовые события): А – условие 1 – $(i(p1;p2)=true, p3=false)$; В – условие 2 – $(i(p1;p3)=true, p2=false)$; С – условие 3 – $(i(p2;p3)=true, p1=false)$.

Рассчитаем вероятности базовых событий. Для этой цели обычно применяются: результаты тестирования ИС на атаки, экспертные оценки, известные статистические данные, опыт эксплуатации ИС и т. д. Мы использовали оценки эксперта. Использовалась трехбалльная шкала. Вероятности базовых событий определялись по формуле

$$P = w_1 \cdot u(S) + w_2 \cdot u(C) + w_3 \cdot u(L), \quad (1)$$

где w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты, $\sum_{i=1}^3 w_i = 1, w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$; S – сложность атаки

(1 – реализация атаки не требует усилий, 2 – атаку просто реализовать, 3 – атака сложна в реализации), C – стоимость атаки (1 – атака низкой стоимости, 2 – атака средней стоимости, 3 – атака высокой стоимости), L – сложность обнаружения атаки (1 – атаку сложно обнаружить, 2 – атаку достаточно сложно обнаружить, 3 – атаку легко обнаружить). $u(x)$ – функция преобразования, вычисляемая по формуле

$$u(x) = \frac{c}{x}, \quad (2)$$

где c – коэффициент преобразования.

вий: время нажатия и паузы между нажатиями соответствуют эталону обучаемого, а скорость набора не соответствуют эталону обучаемого ($i(p1;p2)=true, p3=false$); время нажатия и скорость набора соответствуют эталону обучаемого, а паузы между нажатиями не соответствуют эталону обучаемого ($i(p1;p3)=true, p2=false$); время нажатия не соответствует эталону обучаемого, а паузы между нажатиями и скорость набора соответствуют эталону обучаемого ($i(p2;p3)=true, p1=false$).

Перечисленные условия образуют совокупность возможных путей атак на обозначенный актив ИС.

Для устранения атак нами были предусмотрены следующие контрмеры: в случае несоответствия одного из параметров эталону обучаемого необходимо предусмотреть дополнительную аутентификацию пользователя в виде ввода им контрольной фразы ($c1$), в случае повторного несоответствия одного из параметров эталону пользователя – отказать субъекту в доступе к ИС ($c2$).

Дерево атак, соответствующее сформулированным выше условиям, представлено на рис. 1.

3. Вероятностный подход к оценке рисков ИС

Вероятностный подход в случае идентификации [6, 13–15] пользователя был использован нами для оценки вероятности успешности атаки

Коэффициент преобразования вычисляется экспериментальным путем. Значение, используемое в данном примере, вычислялось из допущения, что при минимальных оценках всех базовых событий (худший случай) вероятность основного события должна попадать под определение высокой вероятности успешной атаки. В данном случае использовалось значение $c = 0,3$.

Составим таблицу значений базовых событий (см. таблицу).

Значения базовых событий
Values of basic events

Имя базового события	S – сложность атаки	C – стоимость атаки	L – сложность обнаружения атаки
A	1	1	1
B	1	1	3
C	1	1	3

Уровень сложности обнаружения базового события А определен нами как низкий, так как из трех не совпадает параметр, наиболее зависящий от психологического (физического и т. п.) состояния пользователя, он менее стабилен, его легче как подделать, так и обнаружить.

Рассчитаем вероятности базовых событий по формуле (1):

$$P_A = \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{1} = 0,3;$$

$$P_C = P_B = \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,3}{3} = 0,073,$$

где P_A, P_B, P_C – вероятности базовых событий А, В, С соответственно. Тогда дерево атак на первом этапе (без оценки эффективности контрмеры c_1) будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

Далее рассчитывалась степень эффективности предлагаемых контрмер. Вероятность несанкционированного доступа к информации в условиях применения мер и средств защиты в компьютерной системе существенно зависит от того, где блокируется доступ к информации. У нас простой случай – на входе в ИС. В этом случае эффективность защиты информации можно рассчитать по формуле

$$\eta(t) = 1 - P_{acc}(t) \cdot \max K, \tag{3}$$

где $P_{acc}(t)$ – вероятность доступа нарушителя в ИС; $\max K$ – максимальный коэффициент опасности данной атаки.

Для базового события А: $P_{acc}(t) = 0,3$. Коэффициент опасности атаки вычислялся нами на основании баллов (дискретно от 1 до 10), выставленных экспертом по трем критериям (возможность возникновения источника угрозы ($K_1 = 10$), степень его готовности произвести атаку ($K_2 = 10$), а также фатальность для ИС от реализации атаки ($K_3 = 1$), по формуле

$$\max K = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{10^3}. \tag{4}$$

Получаем $\max K = 0,1$, тогда $\eta(t)_A = 1 - 0,3 \cdot 0,1 = 0,97$.

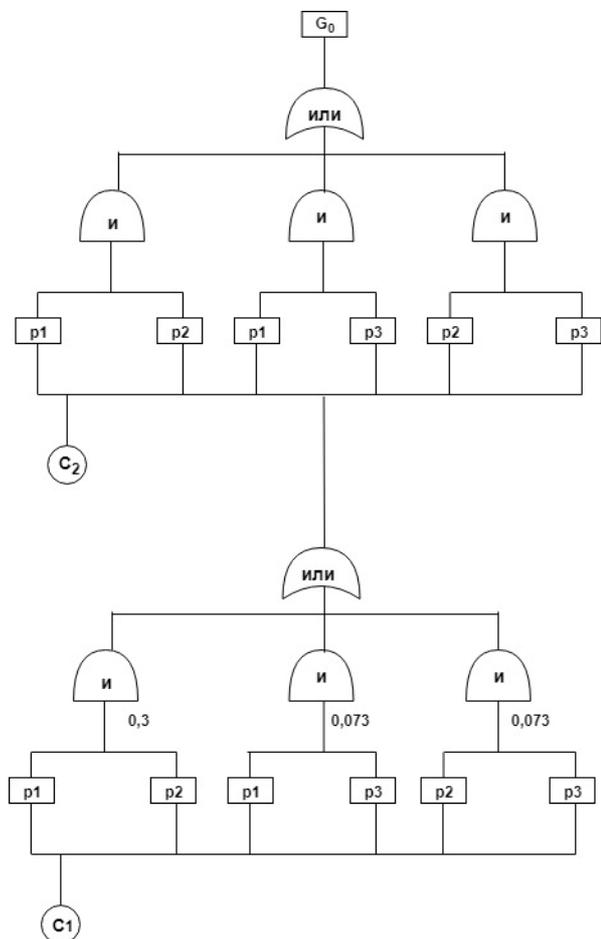


Рис. 2. Дерево атак на первом этапе оценки
Fig. 2. Attack tree at the first stage of evaluation

Тогда вероятность прохождения нарушителя ($P_{нар}$) к следующему узлу дерева атак составит для случая А: $P_{нар} = 1 - 0,97 = 0,03$.

Эффективность контрмеры C_1 для события А – высокая.

Для базовых событий В и С:

$$P_{acc}(t) = 0,073; \eta(t)_A = 1 - 0,073 \cdot 0,1 = 0,99.$$

Тогда вероятность прохождения нарушителя к следующему узлу дерева атак составит для случаев А и В: $P_{нар} = 1 - 0,99 = 0,01$.

Эффективность контрмеры C_1 для событий В и С – высокая.

Дерево атак с учетом оценки эффективности контрмеры C_1 будет выглядеть следующим образом (рис. 3).

Аналогичным образом оценивалась эффективность применения контрмеры C_2 . P_A, P_B, P_C соответственно равны 0,02, 0,01 и 0,01. Эффективность применения контрмеры C_2 для событий А, В, С составила 0,98 и 0,99, 0,99 соответственно. Дерево атак на завершающем этапе оценки представлено на рис. 4.

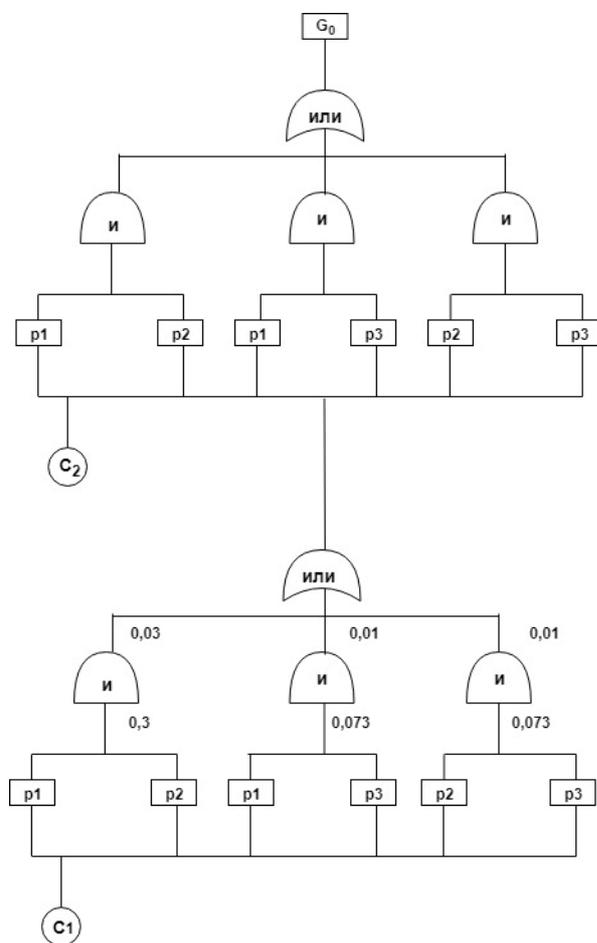


Рис. 3. Дерево атак на втором этапе оценки
Fig. 3. Attack tree at the second stage of evaluation

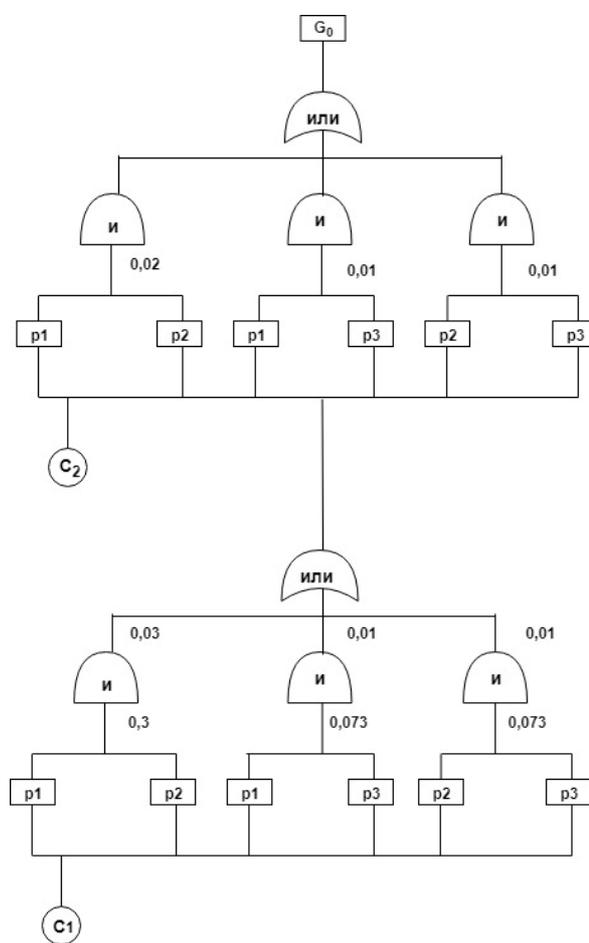


Рис. 4. Дерево атак на завершающем этапе оценки
Fig. 4. Attack tree at the final stage of evaluation

Заключение

В статье рассмотрена методика применения вероятностного подхода для оценки вероятности успешности атаки на актив ИС и эффективности предлагаемых контрмер.

Рассмотренная в рамках статьи методика анализа защищенности используется при проведении научно-исследовательских работ магистрантами Владимирского государственного университета, занимающимися проблемой оценки защищенности ИС.

Направление дальнейших исследований заключаются в исследовании способов уменьшения вероятности успешной атаки и создании метода автоматизированного выбора контрмер.

Таким образом, исследуемая проблема многоаспектна и не может быть исчерпана настоящей работой. Требуется объединенные усилия ученых различных профилей для рассмотрения как можно большего количества связей и отношений в ней.

Работа выполнена во Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Список литературы

1. Алпеев Е.В., Стадник А.Н., Скрыль С.В. Методика прогнозирования компьютерных атак на основе определения весов атрибутов компьютерной атаки с применением метода деревьев решений // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 6. С. 82–92. ISSN: 2306-1456.
2. Кляус Т.К., Гатчин Ю.А. Определение вероятности реализации атак на информационную систему с помощью деревьев событий // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2018. № 4 (30). С. 31–37. DOI: 10.14529/secur180405, ISSN: 2225-5435.
3. Котенко И. В., Степашкин М.В., Котенко Д.И., Дойникова Е.В. Оценивание защищенности информационных систем на основе построения деревьев социо-инженерных атак // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 5–9. ISSN: 0021-3454, eISSN: 2500-0381.
4. Середкин М.Д., Атомян А.С., Моргунов В.М. Классификация компьютерных атак на основе деревьев решений // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2019. № 28. С. 107–108. ISSN: 2305-994X.
5. Чечулин А.А. Построение и анализ деревьев атак на компьютерные сети с учетом требования оперативности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. СПб.: С.-Петербург. ин-т информатики и автоматизации РАН, 2013. 152 с.
6. Linets G.I., Melnikov S.V. Criterion for identification of the probability model of the state of satellite communication channels // Современная наука и инновации. 2020. № 2 (30). С. 29–36.
7. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России): сайт. URL: <http://fstec.ru> (дата обращения: 23.02.2023).
8. Сапиев А.З. Идентификация пользователей сети по клавиатурному почерку // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4 (10). С. 45–46.
9. Пашенко Д.В., Бальзанникова Е.А. Метод идентификации пользователя по клавиатурному почерку с использованием модели доверия // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. № 3 (55). С. 96–99. DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0018, ISSN: 2221-951X.
10. Казачук М.А. Динамическая аутентификация пользователей на основе анализа работы с клавиатурой компьютера: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 155 с.
11. Исследование системы идентификации и подтверждения легитимности доступа на основе динамических методов биометрической аутентификации / М.М. Пулято, А.С. Макарян, Ш.М. Чич, В.К. Маркова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 3 (51). С. 83–93. DOI: 10.21672/2074-1707.2020.51.1.083-093, ISSN: 2074-1707.
12. Артюшина Л.А., Троицкая Е.А. Некоторые подходы к оценке информативности параметров идентификации пользователя по клавиатурному почерку на основе поведенческой биометрии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 30–38. DOI: 10.14529/ctcr220303
13. Разработка вероятностной-имитационной математической модели формирования параметров поврежденности обработанной поверхности при двукратном технологическом воздействии / А.И. Денчик, Ж.К. Мусина, А.Ж. Касенов, Л.Р. Мусина // Наука и техника Казахстана. 2022. № 1. С. 28–39. DOI: 10.48081/JGZE9345
14. Дородников Н.А. Разработка методики повышения уровня защищенности вычислительных сетей на основе вероятностной поведенческой модели, использующей деревья атак: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. СПб.: С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики, 2017. 185 с.

15. Кожомбердиева Г.И., Бураков Д.П., Хамчичев Г.А. Разработка программ для поддержки принятия решений на основе байесовских вероятностных моделей // Программные продукты и системы. 2022. № 2. С.184–194. DOI: 10.15827/0236-235X.138.184-194

References

1. Alpeyev E.V., Stadnik A.N., Skryl S.V. A method of predicting computer attacks based on determining the weights of attributes of a computer attack using the decision tree method. Electronic network polythematic journal “Scientific Works of the Kuban State Technological University”. 2021;6:82–92. (In Russ.) ISSN: 2306-1456.

2. Klyaus T.K., Gatchin Yu.A. Probability evaluation of attacks on information system using event tree analysis. Journal of the Ural Federal district. Information security. 2018;4(30):31–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/secur180405, ISSN: 2225-5435.

3. Kotenko I.V., Stepashkin M.V., Kotenko D.I., Doynikova E.V. Assessment of information system protectability on the base of development of tree of social engineering attack. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Journal of Instrument engineering*. 2011;54(12):5–9. (In Russ.) ISSN: 0021-3454, eISSN: 2500-0381.

4. Seredkin M.D., Atomyan A.S., Morgunov V.M. [Classification of computer attacks based on decision trees]. *Metody i tekhnicheskiye sredstva obespecheniya bezopasnosti informatsii*. 2019;28:107–108. (In Russ.) ISSN: 2305-994X.

5. Chechulin A.A. *Postroyeniye i analiz derev'yev atak na komp'yuternyye seti s uchetom trebovaniya operativnosti: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.19* [Construction and analysis of attack trees on computer networks, taking into account the requirements of efficiency. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg: St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; 2013. 152 p. (In Russ.)

6. Linets G.I., Melnikov S.V. Sriterion for identification of the probability model of the state of satellite communication channels. *Modern Science and Innovations*. 2020;2(30):29–36.

7. *Federal'naya sluzhba po tekhnicheskomu i eksportnomu kontrolyu (FSEK Rossii): sayt* [Federal Service for Technical and Export Control (FSTEC of Russia): website]. (In Russ.) Available at: <http://fstec.ru> (accessed 23.02.2023).

8. Sapiev A.Z. Identification of network users by keyboard rhythm. *Bulletin of Vologda State University. Series Technical Sciences*. 2020;4(10):45–46. (In Russ.)

9. Pashchenko D.V., Balzannikov E.A. A method for identifying a user by keyboard handwriting using a trust model. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*, 2021;3(55):96–99. (In Russ.) DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0018, ISSN: 2221-951X.

10. Kazachuk M.A. *Dinamicheskaya autentifikatsiya pol'zovateley na osnove analiza raboty s klaviaturoy komp'yutera: dis. kand. fiz.-mat. nauk: 05.13.11* [Dynamic user authentication based on computer keyboard operation analysis. Cand. sci. diss.]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2019. 155 p. (In Russ.)

11. Putyato M.M., Makaryan A.S., Chich Sh.M., Markova V.K. System development for identification and confirmation of access legitimacy based on biometric authentication dynamic methods. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian journal: control and high technologies*. 2020;3(51):83–93. (In Russ.) DOI: 10.21672/2074-1707.2020.51.1.083-093, ISSN: 2074-1707.

12. Artyushina L.A., Troitskaya E.A. Some approaches to assessing the informative of user identification parameters by keyboard handwriting based on behavioral biometrics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3):30–38. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220303

13. Denchik A.I., Musina Zh.K., Kasenov A.Zh., Musina L.R. Development of a probabilistic simulation mathematical model for the formation of damage parameters of a treated surface under a two-time technological impact. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2022;1:28–39. (In Russ.) DOI: 10.48081/JGZE9345

14. Dorodnikov N.A. *Razrabotka metodiki povysheniya urovnya zashchishchennosti vychislitel'nykh setey na osnove veroyatnostnoy povedencheskoy modeli, ispol'zuyushchey derev'ya atak: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.19* [Development of a technique for increasing the level of security of computer networks based on a probabilistic behavioral model using attack trees. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg:

burg: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; 2017. 185 p. (In Russ.)

15. Kozhombardieva G.I., Burakov D.P., Khamchichev G.A. Development of decision support programs based on Bayesian probabilistic models. *Software & Systems*. 2022;2:184–194. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.138.184-194

Информация об авторе

Артюшина Лариса Андреевна, канд. пед. наук, магистр направления «Информационные системы и технологии», доц. кафедры информатики и защиты информации, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; larisa-artusina@yandex.ru.

Information about the author

Larisa A. Artyushina, Cand. Sci. (Education), Master's degree in Information Systems and Technologies, Ass. Prof. of the Department of Informatics and Information Protection, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; larisa-artusina@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 24.02.2023

The article was submitted 24.02.2023

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ РАССЛОЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ АКТИВНОМ ТЕПЛОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Л.Ю. Костылева¹, kostylevali@susu.ru

Г.И. Волович², g_volovich@mail.ru

С.Г. Некрасов¹, nekrasovsg@susu.ru

Е.А. Рец¹, retcea@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. При выявлении скрытых дефектов соединения слоев в изделиях из многослойных материалов используют различные методы неразрушающего контроля, в том числе активный тепловой контроль. Одна из основных трудностей при использовании этого метода заключается в обработке и интерпретации полученных данных теплового изображения. Особенностью исследуемых дефектов нарушения сплошности соединения слоев биметаллических пластин является то, что глубина нахождения дефекта известна, и основной задачей становится определение его размеров. Для этого применяют различные методы, в том числе анализ пространственных профилей температуры. **Цель исследования:** анализ использования различных подходов к определению поперечного размера дефекта расслоения между металлами при моделировании процесса активного теплового неразрушающего контроля сталеалюминиевых пластин. **Материалы и методы.** Используются методы математического и компьютерного моделирования, численного дифференцирования. Размер дефекта определяется по проекциям половины высоты амплитуды сигнала и экстремума производной функции температурного сигнала. Вычисления и графические построения производятся с использованием математического пакета GNU Octave. **Результаты.** Выполнено моделирование для различных значений мощности теплового потока, времени нагрева и охлаждения. На основе полученных расчетных данных построены графики распределения температурного сигнала по поверхности многослойной биметаллической пластины. Определены значения радиуса дефекта по проекциям характерных точек. **Заключение.** Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что использование проекции экстремума производной функции температурного сигнала позволяет точно оценить размер дефекта, а в случае с проекцией точки, соответствующей половине высоты амплитуды сигнала, оценка получается заниженной. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших экспериментальных исследований процессов активного теплового контроля изделий из многослойных биметаллических материалов.

Ключевые слова: биметаллы, активный тепловой неразрушающий контроль, численное моделирование, дефект соединения между слоями металлов, дефектоскопия, дефектометрия

Для цитирования: Определение поперечных размеров дефектов расслоения биметаллической пластины при активном теплом неразрушающем контроле / Л.Ю. Костылева, Г.И. Волович, С.Г. Некрасов, Е.А. Рец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 102–110. DOI: 10.14529/ctcr230209

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr230209

DETERMINING THE DIMENSIONS OF DELAMINATING DEFECTS IN A BIMETALLIC PLATE USING ACTIVE THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING

L.Yu. Kostyleva¹, kostylevali@susu.ru

G.I. Volovich², g_volovich@mail.ru

S.G. Nekrasov¹, nekrasovsg@susu.ru

E.A. Retc¹, retcea@susu.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Various methods of nondestructive testing, including active infrared thermography, are used to detect latent subsurface defects in the contact of layers in multilayer products. One of the main difficulties using this method consists in processing and interpreting the thermal image data. The peculiarity of investigated defects of bimetal plate layers continuity violation is that the depth of defect location is known and the main task is to determine its size. Some methods are used for this purpose including analysis of spatial temperature profiles. **Aim.** To analyse the use of various approaches to determining the transverse dimensions of a delamination between metals in simulating active thermal non-destructive testing of steel-aluminium plates. **Materials and methods.** Mathematical and computer simulating methods, numerical differentiation are used. The delamination size is determined by projections of half the height of the amplitude signal and the extremum of the derivative of the temperature signal function. Calculations and graphical constructions are performed using the mathematical package GNU Octave. **Results.** Numerical simulation is carried out for different values of heat flow power, heating and cooling time. The temperature signal distribution over the surface of a multilayer bimetallic plate has been plotted. The values of the defect radius according to the projections of the characteristic points are determined. **Conclusion.** The results of simulation allow us to conclude that using the projection of the extremum of the temperature signal derivative function allows us to accurately estimate the defect size, while in the case of the point projection corresponding to half of the signal amplitude height, the result is underestimated. The obtained results can be used for further experimental studies of processes of active thermal non-destructive testing of products made of multilayer bimetallic materials.

Keywords: bimetall, active thermal non-destructive testing, numerical modeling, delamination in metal layers, flaw detection, defectometry

For citation: Kostyleva L.Yu., Volovich G.I., Nekrasov S.G., Retc E.A. Determining the dimensions of delaminating defects in a bimetallic plate using active thermal non-destructive testing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(2):102–110. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230209

Введение

Активный тепловой неразрушающий контроль является одним из перспективных методов выявления скрытых дефектов соединения слоев в изделиях из многослойных материалов [1]. При его проведении поверхность объекта нагревают или охлаждают с одной из сторон, а затем измеряют температуру на поверхности при помощи различных контактных или бесконтактных устройств (термодатчиков, пирометров, тепловизоров и др.). Если регистрация значений температуры производится со стороны нагрева, такую процедуру называют односторонней или «контролем на отражение», если с обратной – двухсторонней, или «контролем на прохождение» [1]. При наличии неоднородностей в материале (трещин, расслоений, пустот и др.) на соответствующих участках поверхности будет наблюдаться локальный перегрев или понижение температуры.

Одной из наиболее сложных задач является интерпретация полученных данных – определение типа дефекта и его параметров (поперечных размеров, глубины залегания и др.). Для ее решения используют математические модели и алгоритмы, учитывающие свойства объекта и технологические режимы контроля.

Особенностью исследуемых дефектов нарушения сплошности соединения слоев биметаллических пластин является то, что глубина нахождения дефекта известна, и основной задачей становится определение его размеров.

На термограммах экспериментальных образцов дефект создает видимый «отпечаток», образуемый точками с повышенной или пониженной температурой. Его размеры могут быть определены в пикселях с последующим переводом в традиционные метрические единицы. Однако при визуальной оценке погрешность может достигать 20 %, что является следствием увеличения температурного «отпечатка» при диффузии тепла в образце [1, 2].

Для более точной оценки применяют различные методы повышению информативности термографического изображения (усреднение, вычитание, деление изображений [3], наложение термограмм, полученных одновременно при односторонней и двусторонней процедуре контроля [4] и др.).

Помимо визуальной оценки определение размеров дефекта выполняют путем анализа профиля температуры на поверхности образца. Для этого набор значений температуры в отдельных точках поверхности преобразуют в графическое изображение температурного поля. Над дефектным участком полученный график функции температуры имеет характерный профиль с максимальной амплитудой в центральной точке дефекта.

В англоязычных источниках описан способ определения размера дефекта, обозначаемый аббревиатурой FWHM – Full Width Half Maximum [5, 6]. Ширина дефекта измеряется по положению проекции точки, соответствующей половине высоты максимального температурного перепада. Этот способ оценки дает приемлемые результаты, однако для некоторых материалов оценка размера дефекта получается заниженной [7, 8]. Описаны адекватные результаты определения размеров расслоений в углепластиковых композитных материалах [9, 10] и коррозии стальных пластин [5].

В.П. Вавилов и В.В. Ширяев показали, что координата экстремума производной функции температурного сигнала соответствует проекции границы внутреннего дефекта [11]. При этом точность определения размеров составляет до одного радиального шага пространственной сетки. Данный способ дает удовлетворительные результаты при определении размеров пор в алюминии и расслоений в пластиковых композитных материалах [1, 12, 13].

При определении поперечных размеров дефектов для более корректного расчета значений температурного сигнала над дефектом используют двух- и трехмерные модели теплового состояния объекта контроля, поскольку они учитывают тепловое рассеяние вокруг участка многослойного материала с внутренним дефектом.

Данная статья является продолжением исследования, описанного в работе [14], где была рассмотрена математическая модель теплового состояния многослойной пластины с дефектом соединения слоев и алгоритм решения краевой задачи теплового состояния с применением методов компьютерного моделирования. Целью исследования является анализ использования различных подходов к определению поперечного размера дефекта расслоения между металлами при активном тепловом неразушающем контроле сталепластины.

Материалы и методы

Рассмотрим трехслойную пластину (рис. 1) с наружными слоями из нержавеющей стали (1, толщиной h_1) и (3, толщиной h_3), между которыми расположен теплораспределительный слой из алюминия (2, толщиной h_2). Тепловой поток от источника нагрева $q_{\text{изл}}$ направлен по нормали к слоям.

Исследуются дефекты в виде воздушной прослойки в местах контакта наружных слоев изделия с внутренним теплораспределительным слоем с одной или другой его сторон. Размеры таких дефектов (диаметр d и толщина δ) существенно меньше размеров слоев пластины.

Процесс нагрева соответствует условиям проведения импульсного активного ТК. Для выявления дефектов с обеих сторон теплораспределительного слоя модель учитывает условия проведения односторонней и двусторонней процедур ТК.

Для обеспечения возможности определения поперечных размеров дефектов пластина рассматривается как симметричная относительно оси z в цилиндрической системе координат (r, z) . Все слои пластины имеют форму цилиндра радиуса R , причем $R \gg h_i$. Для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi = 0$), считаем, что температурное поле нестационарное и двухмерное – $T(r, z, \tau)$.

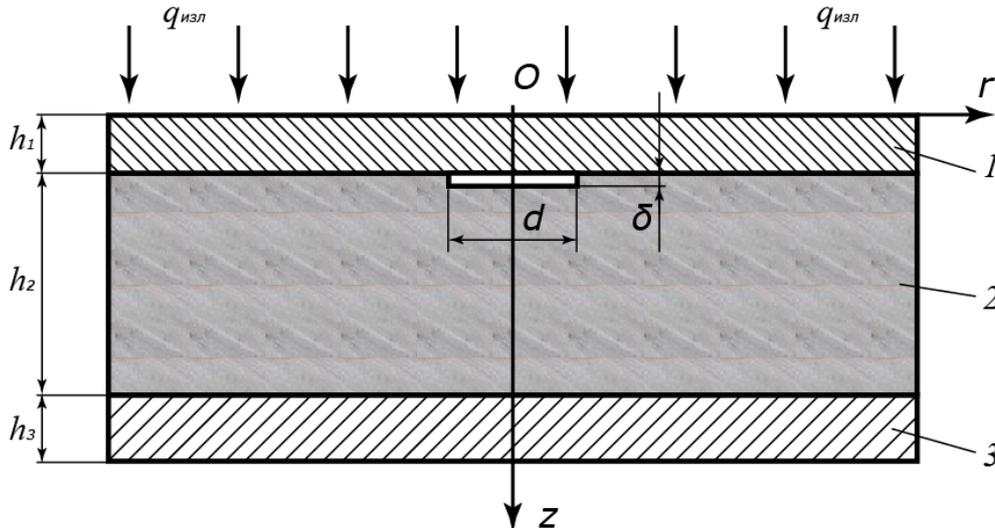


Рис. 1. Трехслойная пластина с цилиндрическим дефектом, ее основные размеры
Fig. 1. Three-layer plate with a cylindrical delamination, its main dimensions

С учетом сформулированных допущений полагаем, что распределение температуры в исследуемой пластине описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0$, $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$):

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер слоя; τ – время; $T(r, z, \tau)$ – температура; $a_i = \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i)$ – коэффициент температуропроводности; λ_i , ρ_i , c_i – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов.

Индекс 1 соответствует стальному слою при $0 \leq z \leq h_1$; индекс 2 – алюминиевому слою при $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$; индекс 3 – стальному слою при $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$.

Подробное описание модели импульсного нагрева и последующего остывания многослойной пластины при наличии дефекта расслоения с учетом граничных условий и различных вариантов нагрева и охлаждения (односторонний и двухсторонний тепловой контроль) приведено в [14].

Определяются значения температуры T на поверхности пластины и дифференциального температурного сигнала ΔT , равного разности температур в исследуемой точке T и в зоне, принятой за бездефектную, $T_{\text{бд}}$:

$$\Delta T(r, z, \tau) = T(r, z, \tau) - T_{\text{бд}}(r, z, \tau). \quad (2)$$

Для полученных функций распределения температуры и температурного сигнала вычисляются значения производных по формуле

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r}. \quad (3)$$

Оценка размера дефекта выполняется по положению точек, соответствующих проекциям экстремума производной и половины высоты амплитуды сигнала на ось r .

Численное моделирование и построение графиков выполняются с применением программного продукта GNU Octave (аналог MATLAB) [15].

Результаты

Рассмотрим решение задачи для различных режимов нагрева и времени наблюдения. Размеры пластины (см. рис. 1) $h_1 = h_3 = 1,7$ мм, $h_2 = 5,6$ мм, радиус пластин $R = 50$ мм, толщина воздушного зазора $\delta = 0,2$ мм. Начальная температура пластины $T_0 = 20$ °С, температура окружающей среды $t_{\text{окр}} = 20$ °С.

Теплофизические свойства стали: плотность $\rho_{\text{ст}} = 7850$ кг/м³, удельная теплоемкость $c_{\text{ст}} = 504$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ст}} = 17$ Вт/(м·К). Теплофизические свойства

алюминия: плотность $\rho_{al} = 2712 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость $c_{al} = 897 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_{al} = 203,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

В различных вариантах решения диаметр воздушного зазора d принимается равным 5 и 10 мм, мощность теплового потока нагрева $q_{изл}$ составляет 10, 30 и 100 кВт/м².

Нагрев и измерение температуры выполняются со стороны дефекта. Время нагрева и шаг расчета выбираются в зависимости от величины мощности теплового потока.

На рис. 2 представлены графики распределения температуры по поверхности пластины со стороны дефекта при $d = 5 \text{ мм}$, $q_{изл} = 100 \text{ кВт/м}^2$. Время нагрева $\tau_1 = 1 \text{ с}$, шаг расчета 0,01 с. Выполнены расчеты для времени наблюдения $\tau_1 = 1 \text{ с}$ (после нагрева, график T_1) и $\tau_2 = 1,5 \text{ с}$ (после охлаждения на воздухе, график T_2).

Определены точки, соответствующие половине высоты амплитуды изменения температуры $\Delta T_1/2$ (после нагрева) и $\Delta T_2/2$ (после охлаждения).

Также показаны графики производных функций распределения температуры $\partial T_1/\partial r$ (после нагрева) и $\partial T_2/\partial r$ (после охлаждения).

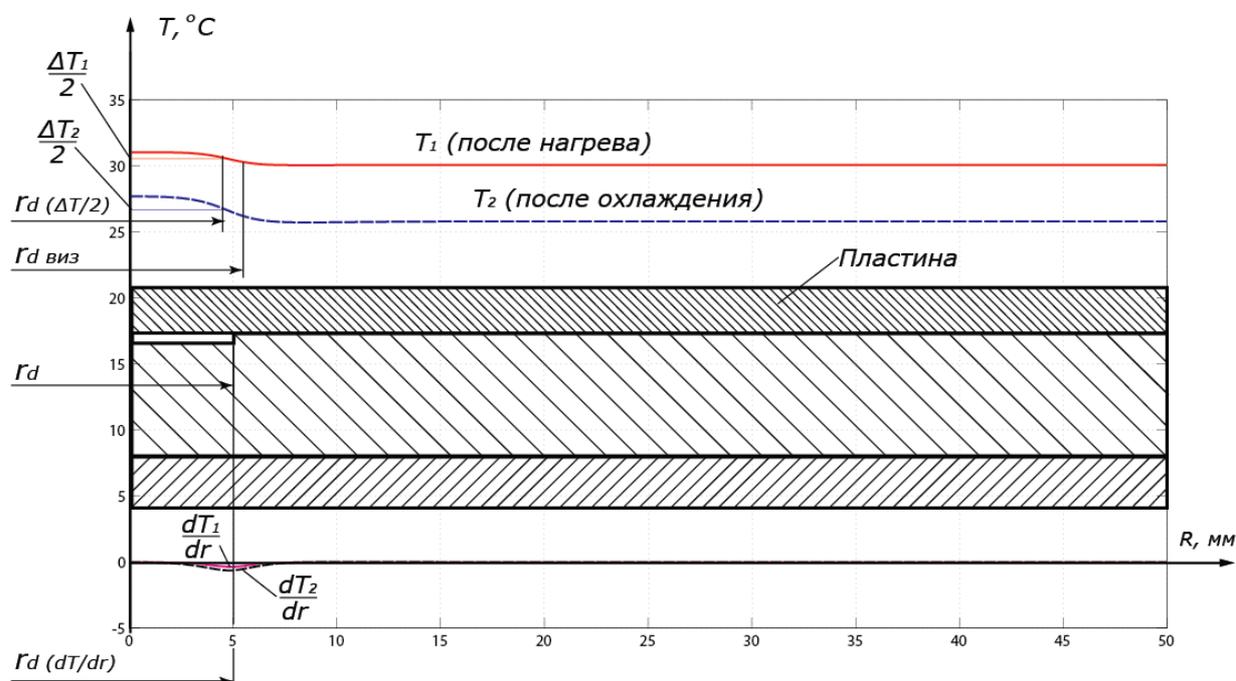


Рис. 2. Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля температуры
Fig. 2. Defect radius determined by analysing the temperature profile

Видно, что проекции экстремума производной $r_d(\partial T/\partial r)$ точно соответствуют радиусу дефекта r_d как при наблюдении после нагрева, так и после охлаждения. В то же время радиус дефекта, определенный по проекции половины высоты амплитуды температуры $r_d(\Delta T/2)$, меньше фактического размера дефекта в обоих случаях. При визуальной оценке радиус дефекта $r_{d \text{ виз}}$ превышает фактический.

На рис. 3 представлены графики распределения дифференциального температурного сигнала ΔT_1 (после нагрева) и ΔT_2 (после охлаждения). При расчете значений температурного сигнала в качестве температуры бездефектной зоны используется значение T_i в точке $r_i = R$. Построены графики производных функций температурного сигнала $\partial(\Delta T_1)/\partial r$ (после нагрева) и $\partial(\Delta T_2)/\partial r$ (после охлаждения), определены проекции характерных точек для оценки радиуса дефекта.

Оценки радиуса дефекта различными способами соответствуют оценкам, полученным при анализе профиля распределения температуры (см. рис. 2), но переход к дифференциальному температурному сигналу позволяет более наглядно представить результаты проведенных вычислений.

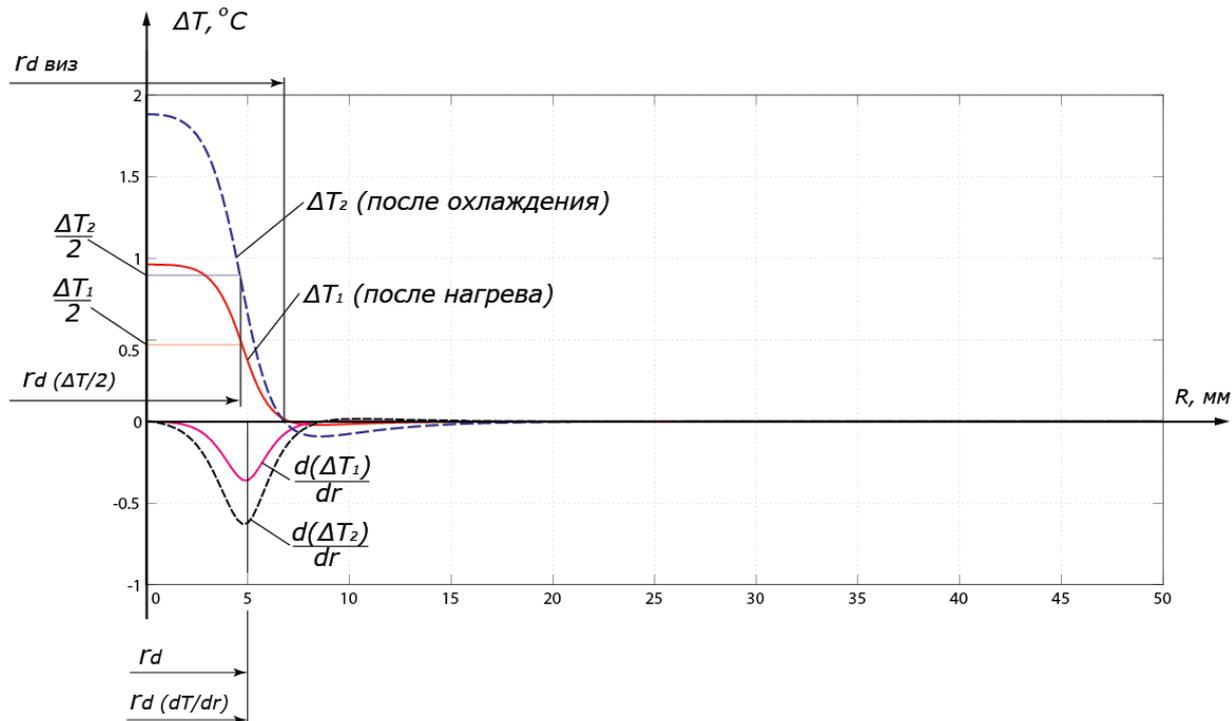


Рис. 3. Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля дифференциального температурного сигнала

Fig. 3. Defect radius determined by analysing the differential temperature signal profile

В таблице представлены результаты моделирования теплового состояния для различных значений мощности теплового потока, времени нагрева и охлаждения.

Результаты моделирования

Таблица

Table

Simulation result

Тепловой поток, Вт/м ²	Время нагрева, с	Время наблюдения, с	Шаг, с	r_d , мм	$r_d \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$, мм	$r_d \left(\frac{\Delta T}{2} \right)$, мм
10 000	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75
30 000	5	5	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	10	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	15	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	5	0,1	10,0	10,0	9,25
	5	10	0,1	10,0	10,0	8,50
	5	15	0,1	10,0	10,0	8,25
	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75

Тепловой поток, Вт/м ²	Время нагрева, с	Время наблюдения, с	Шаг, с	r_d , мм	$r_d \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$, мм	$r_d \left(\frac{\Delta T}{2} \right)$, мм
100 000	1	1	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	0,5	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	6	0,01	5,0	5,0	4,5
	1	1	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	0,5	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	6	0,01	10,0	10,0	9,0
	2	2	0,01	5,0	5,0	5,0
	2	3	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	10	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	2	0,01	10,0	10,0	9,75
	2	3	0,01	10,0	10,0	9,5
	2	10	0,01	10,0	10,0	8,5

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что оценка радиуса дефекта по проекции экстремума производной температуры и дифференциального температурного сигнала обеспечивает точное определение размера дефекта на используемой модели при различных параметрах режима нагрева.

Определение радиуса дефекта по проекции точки, соответствующей половине максимального температурного перепада, приводит к занижению размера дефекта. При малых временах наблюдения оценка более точная (отклонение в большинстве случаев не превышает одного радиального шага расчетной сетки), а при увеличении времени охлаждения величина отклонения растет.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что использование проекции экстремума производной функции температурного сигнала позволяет точно оценить размер дефекта, а в случае с проекцией точки, соответствующей половине высоты амплитуды сигнала, оценка получается заниженной. Полученные данные в целом соответствуют результатам исследований для других видов материалов [5, 13] и могут быть использованы для дальнейших численных и экспериментальных исследований теплового состояния биметаллических пластин в процессе дефектоскопии методами активного теплового неразрушающего контроля.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: науч. изд. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Martin R., Gyekenyesi A.L., Shepard S. Interpreting the results of pulsed thermography data // *Materials Evaluation*. 2003. Vol. 61. P. 611–616. URL: <https://www.researchgate.net/publication/292229377> (дата обращения: 16.01.2023).
3. Shepard S.M. Advances in pulsed thermography // *Proc. SPIE 4360, Thermosense XXIII*. DOI: 10.1117/12.421032. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4360/1/Advances-in-pulsed-thermography/10.1117/12.421032> (дата обращения: 16.01.2023).
4. Галдин Д.А., Каледин В.О. Применение термографии и моделирования температурных полей в композитных пластинах для неразрушающего контроля // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 11. С. 83–86.
5. Almond D.P., Saintey S., Lau S.K. Edge effects and defect sizing by transient thermography // *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar*. 1994. P. 247–252. DOI: 10.21611/qirt.1994.037. URL: <http://qirt.org/archives/qirt1994/papers/037.pdf> (дата обращения: 16.01.2023).
6. Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared ther-

mography [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228417761> (дата обращения: 16.01.2023).

7. Almond D.P., Lau S.K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994. Vol. 27, no. 5. P. 1063–1069. DOI: 10.1088/0022-3727/27/5/027. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/27/5/027> (дата обращения: 16.01.2023).

8. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT / N.P. Avdelidis, D.P. Almond, A. Dobbins et al. // *Progress in Aerospace Sciences*. 2004. Vol. 40. P. 143–162. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001. URL: <https://www.researchgate.net/publication/222923920> (дата обращения: 16.01.2023).

9. Comparative study of Thermographic Signal Reconstruction and Partial Least Squares Thermography for detection and evaluation of subsurface defects / F. López, V.P. Nicolau, C. Ibarra-Castanedo et al. // *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. DOI: 10.21611/QIRT.2014.095. URL: <http://www.qirt.org/archives/qirt2014doi/papers/QIRT-2014-095.pdf> (дата обращения: 16.01.2023).

10. Ibarra-Castanedo C., Bendada A., Maldague X. Thermographic Image Processing for NDT // *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires – Octubre 2007*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/254738827> (дата обращения: 16.01.2023).

11. Вавилов В.П., Ширяев В.В. Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // *Дефектоскопия*. 1979. № 11. С. 63–65.

12. Vavilov V., Marinetti S., Nesteruk D. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems // *Proc. SPIE*. 6939. DOI: 10.1117/12.775684. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252222222> (дата обращения: 16.01.2023).

13. Vavilov, V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8

14. Определение параметров дефекта расслоения биметаллической пластины посредством активного теплового неразрушающего контроля / О.В. Логиновский, Л.Ю. Костылева, А.А. Максимов, И.М. Ячиков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2021. Т. 21, № 4. С. 37–51. DOI: 10.14529/ctcr210404

15. GNU Octave [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gnu.org/software/octave> (дата обращения: 16.01.2023).

References

1. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing]. Moscow: ID Spektr; 2009. 544 p. (In Russ.)

2. Martin R., Gyekenyesi A.L., Shepard S. Interpreting the results of pulsed thermography data. *Materials Evaluation*. 2003;61:611–616. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/292229377> (accessed 16 January 2023).

3. Shepard S.M. Advances in pulsed thermography. In: *Proc. SPIE 4360, Thermosense XXIII*. DOI: 10.1117/12.421032. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4360/1/Advances-in-pulsed-thermography/10.1117/12.421032> (accessed 16 January 2023).

4. Galdin D.A., Kaledin V.O. Nondestructive testing of composite plates using thermography and thermal fields modelling. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020;11:83–86. (In Russ.)

5. Almond D.P., Saintey S., Lau S.K. Edge effects and defect sizing by transient thermography. In: *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar*; 1994. P. 247–252. DOI: 10.21611/qirt.1994.037. Available at: <http://qirt.org/archives/qirt1994/papers/037.pdf> (accessed 16 January 2023).

6. Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/228417761> (accessed 16 January 2023).

7. Almond D.P., Lau S.K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994;27(5):1063–1069. DOI: 10.1088/0022-3727/27/5/027. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/27/5/027> (accessed 16 January 2023).

8. Avdelidis N.P., Almond D.P., Dobbins A. et al. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT. *Progress in Aerospace Sciences*. 2004;40:143–162. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/222923920> (accessed 16 January 2023).

9. López F., Nicolau V.P., Ibarra-Castanedo C. et al. Comparative study of Thermographic Signal Reconstruction and Partial Least Squares Thermography for detection and evaluation of subsurface defects. In: *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. DOI: 10.21611/QIRT.2014.095. Available at: <http://www.qirt.org/archives/qirt2014doi/papers/QIRT-2014-095.pdf> (accessed 16 January 2023).
10. Ibarra-Castanedo C., Bendada A., Maldague X. Thermographic Image Processing for NDT. In: *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires – Octubre 2007*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/254738827> (accessed 16 January 2023).
11. Vavilov V.P., Shiryaev V.V. [The method for determining defect size in thermal NDT]. *Defectoskopiya (Rus. J. NDT)*. 1979;11:63–65. (In Russ.)
12. Vavilov V., Marinetti S., Nesteruk D. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems. In: *Proc SPIE*. 6939. DOI: 10.1117/12.775684. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/252222222> (accessed 16 January 2023).
13. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8
14. Loginovskiy O.V., Kostyleva L.Yu., Maksimov A.A., Yachikov I.M. Determination of the Parameters of the Lamination of a Bimetallic Plate by Means of Active Thermal Non-Destructive Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4):37–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210404
15. *GNU Octave*. Available at: <http://www.gnu.org/software/octave> (accessed 16 January 2023).

Информация об авторах

Костылева Лилия Юрьевна, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kostylevali@susu.ru.

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

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

Рец Евгения Анатольевна, заведующий лабораторией кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; retcea@susu.ru.

Information about the authors

Liliya Yu. Kostyleva, Senior Lecturer of the Department of Informational and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kostylevali@susu.ru.

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

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

Evgeniya A. Retc, Head of the Laboratory of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; retcea@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 20.01.2023

The article was submitted 20.01.2023

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Т.В. Павлович¹, tv_pavlovich@mail.ru

Е.А. Дронь², elena_dron@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2487-0876>

Г.Г. Куликов³, grisha@molniya-ufa.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

³ АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия

Аннотация. Качество данных – ключевой вопрос в системах поддержки принятия решений. Использование же данных, содержащих одну или несколько логических ошибок, может привести к неправильным решениям и большим потерям для предприятия. **Цель исследования.** Целью исследования является разработка классификации данных, учитывающих профиль производства, типы данных на производстве, формальную структуру бизнес-процессов для каждого типа данных на основе предлагаемой логико-семантической архитектуры цифрового двойника для контроля качества данных. **Теоретико-методологической основой исследования** являются труды отечественных и зарубежных ученых по проблемам управления цифровыми платформами и цифровой трансформацией и цифровых двойников предприятия. **Результаты.** В ходе исследования была обобщена и систематизирована классификация основных логико-семантических факторов некачественного предоставления данных, представлена методика оценки качества данных. Бизнес-процессы сбора, хранения и обработки формализованы для каждого типа данных и определено одно ответственное лицо для соответствующих бизнес-процессов, а также разработаны требования к компетентности для отдельных ответственных лиц и инструмент для контроля качества данных. В результате предлагается подход на основе логико-семантической архитектуры цифрового двойника для контроля качества данных. **Заключение.** В современных реалиях необходима логическая фильтрация огромного количества избыточных данных в системах поддержки принятия решений (ППР). Цифровые двойники (ЦД) в системах поддержки принятия решений могут обеспечить высокое качество исходных цифровых данных для ППР. В этой статье представлен комплексный подход к управлению качеством данных на основе их логико-семантических цифровых двойников при создании эффективной системы поддержки принятия решений на примере нефтегазовых компаний. Управление качеством данных на основе применения логико-семантических цифровых двойников обеспечивает полезность цифровых данных.

Ключевые слова: управление качеством данных, большие данные, цифровые двойники, цифровая трансформация

Для цитирования: Павлович Т.В., Дронь Е.А., Куликов Г.Г. Разработка методики управления качеством данных на основе логико-семантического цифрового двойника // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 111–118. DOI: 10.14529/ctcr230210

DEVELOPMENT OF A DATA QUALITY MANAGEMENT METHODOLOGY BASED ON LOGICAL-SEMANTIC DIGITAL DOUBLE

T.V. Pavlovich¹, tv_pavlovich@mail.ru

E.A. Dron², elena_dron@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2487-0876>

G.G. Kulikov³, grisha@molniya-ufa.ru

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

³ JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russia

Abstract. Data quality is a key issue in decision support systems. The urgency of the problem is due to the fact that the introduction of corporate information systems, digital technologies and digital twins requires strict synchronization and updating of a large amount of data. Management decisions depend on big data. The use of data containing one or more logical errors can lead to incorrect decisions and large losses for the enterprise. **Aim.** The aim of the study is to develop a classification of data that takes into account the production profile, types of data in production, the formal structure of business processes for each type of data based on the proposed logical-semantic architecture of the digital twin for data quality control. **The theoretical and methodological basis of the study** are the works of domestic and foreign scientists on the problems of managing digital platforms and digital transformation and digital twins of the enterprise. **Results.** In the course of the study, the classification of the main logical-semantic factors of poor-quality data provision was generalized and systematized, and a methodology for assessing data quality was presented. Business processes for collecting, storing and processing are formalized for each type of data and one responsible person is identified for the relevant business processes, as well as competency requirements for individual responsible persons and a tool for data quality control are developed. As a result, an approach based on the logical-semantic architecture of the digital twin for data quality control is proposed. **Conclusion.** In modern realities, logical filtering of a huge amount of redundant data in decision support systems (DSS) is necessary. Digital twins (DTs) in decision support systems can provide high quality of initial digital data for PPR. This article presents an integrated approach to data quality management based on their logical-semantic digital twins when creating an effective decision support system using the example of oil and gas companies. Data quality management based on the use of logical-semantic digital twins ensures the usefulness of digital data.

Keywords: data quality management, big data, digital twins, digital transformation

For citation: Pavlovich T.V., Dron E.A., Kulikov G.G. Development of a data quality management methodology based on logical-semantic digital double. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(2):111–118. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230210

Введение

Цифровые двойники – это цифровые копии предприятий, бизнес-процессов или отдельных физических объектов. Цифровой двойник – это инструмент для решения проблем управления эффективностью бизнеса, выбора наилучших способов развития предприятия для обеспечения выживания и благополучия компаний на высоко конкурентных рынках [1, 2].

Качество данных напрямую определяет ценность применения цифрового двойника и качество бизнес-решений.

В этой статье представлен комплексный подход к управлению качеством данных на основе их логико-семантических цифровых двойников при создании эффективной системы поддержки принятия решений на примере нефтегазовых компаний.

Анализ основных факторов качества данных

Согласно стандарту ISO 9000: 2015 основными критериями качества данных являются их полнота, надежность, точность, согласованность, доступность и своевременность.

Необходимо сформулировать дополнительные логико-семантические критерии оценки качества данных, чтобы разделить, какие совокупности данных являются качественными, а какие нет. Для этого можно выделить пять основных логико-семантических факторов некачественного предоставления данных, действие которых снижает их качество:

- 1) упустить факт;
- 2) исказить последовательность событий;
- 3) не указывать время;
- 4) добавить ложную информацию;
- 5) изменить важность.

Эти логико-семантические факторы являются основными причинами неправильного представления менеджера о ситуации. Есть много способов, которыми эти пять факторов неправомерного использования данных могут создать совершенно ложное впечатление о деловой ситуации. Решения, действия или приказы, принятые на основе некорректных данных, приводят к ошибкам и негативным последствиям для бизнеса. Существует большое количество комбинаций этих методов или ошибок, одно и то же сообщение или отчет может содержать сразу несколько факторов по некачественным данным, а в некоторых случаях даже все пять факторов.

Разработана методология оценки качества данных (рис. 1):

- шаг 1 – анализ данных или оценка качества данных в отчетах;
- шаг 2 – анализ ситуации или выявление проблемной области предприятия, которую нужно проверить или проинспектировать прежде всего.

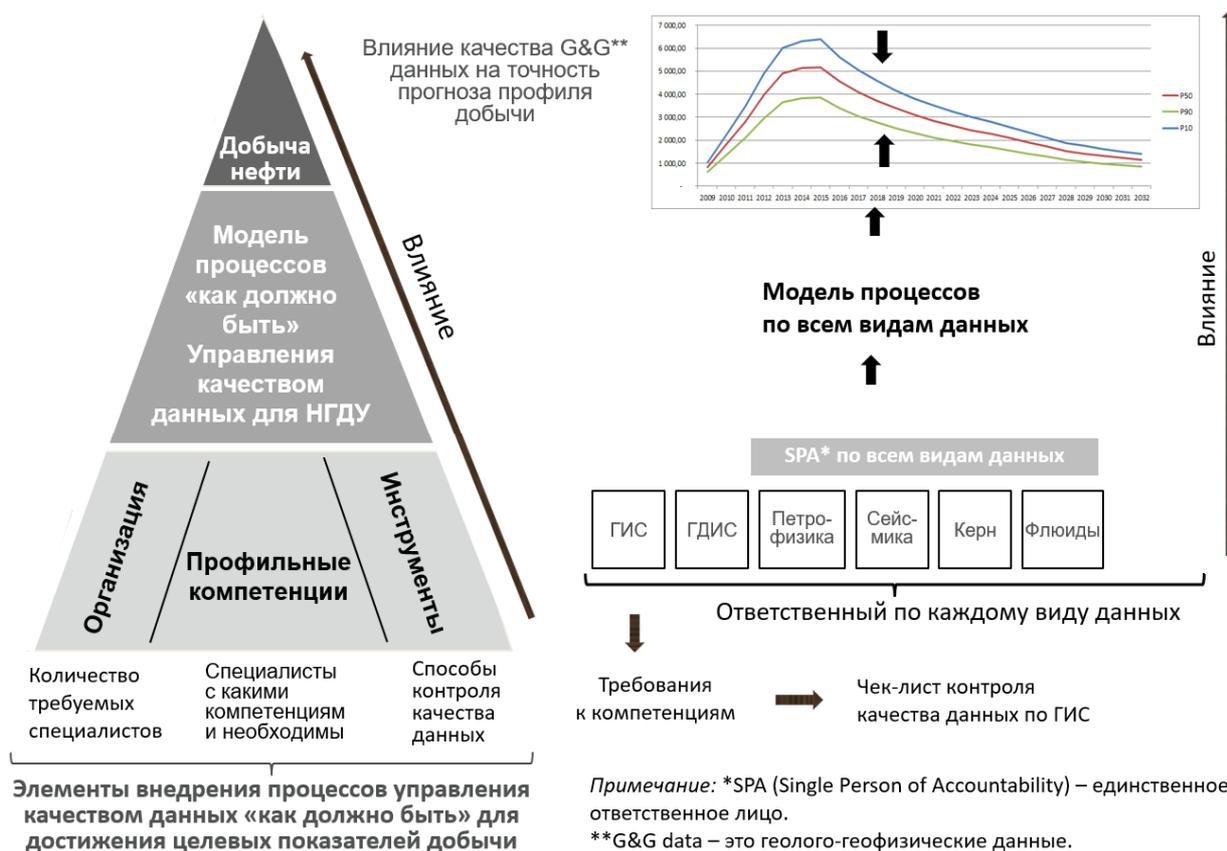


Рис. 1. Концепция методологии управления качеством данных
Fig. 1. Concept of data quality management methodology

В первую очередь, необходимо разработать классификацию данных, так как они влияют на профиль производства. Предлагается семь типов данных, которые получаются в ходе следующих операций: геофизические исследования скважин, гидродинамические исследования скважин, петрофизические исследования, сейсморазведка, анализ керна, анализ флюидов, пространственные данные скважин.

В дальнейшем бизнес-процессы сбора, хранения и обработки необходимо формализовать для каждого типа данных и определить одно ответственное лицо (SPA) для соответствующих бизнес-процессов, а также разработать требования к компетентности для отдельных ответственных лиц и инструмент для контроля качества данных (рис. 2).



Рис. 2. Этапы внедрения методики управления качеством данных
Fig. 2. Stages of implementing data quality management techniques



Рис. 3. Архитектура целостности элементов качества данных
Fig. 3. Data quality element integrity architecture

Этот инструмент представляет собой контрольный список для отдельных ответственных лиц, который включает проверку пяти факторов. Эти факторы были определены как противоположность ошибок данных и недостатков данных.

Контрольный список для проверки качества данных показан на рис. 3. Один ответственный человек сравнивает полученные данные по пяти факторам. В результате аудита может оказаться, что отсутствует один или несколько факторов. В этом случае уточняются недостающие факторы. Только после прояснения каждого фактора единственное ответственное лицо имеет право передавать эти проверенные данные вышестоящему руководству для принятия деловых решений.

Методика управления качеством данных с применением цифровых двойников в системах поддержки принятия решений в нефтегазовых компаниях

Использование умных скважин повысило точность прогноза дебита скважин на 15–20 % с учетом меняющихся условий добычи. Кроме того, виртуальное тестирование режимов работы

скважин позволяет избежать экспериментов с реальными объектами. Это также позволяет специалистам создать несколько сценариев и выбрать лучший по заданным критериям. Вместе с тем в ряде случаев наблюдались серьезные ошибки прогнозов дебитов нефти и выбора режимов работы погружного оборудования. Эти ошибки увеличили эксплуатационные расходы и затраты на подъем, затраты на геологические и технические мероприятия, а также на ремонт и техническое обслуживание оборудования.

Анализ причин этих ошибок показал проблемы с качеством данных. Данные, которые не соответствуют хотя бы одному из пяти элементов качества данных, являются некондиционными, или мы можем сказать, что эти данные содержат минусы. Все это создало предпосылки для уточнения методики управления качеством данных применительно к цифровым аналогам и интеллектуальным полям с целью повышения эффективности поддержки принятия решений. В основе методики лежит следующая идея: качество анализа данных зависит от знания и понимания идеальной картины разработки месторождения, а также целевых показателей (например, по снижению темпов падения добычи). Это означает, что ответственный руководитель должен знать, как должна выглядеть сфера деятельности, в данном случае развитие сферы с рациональной и логической точки зрения [3–6].

Если это условие выполнено, то необходимо выполнить следующие два шага: анализ данных, анализ текущей ситуации.

В методологии управления качеством данных ситуация – это общая картина с определенным объемом данных [7, 8]. Данные – это факты, диаграммы, утверждения, решения, действия, описания, которые предлагаются как правильные [9, 10]. Минусы – это любые отдельные данные, которые предлагаются как верные, но оказываются нелогичными в результате их сравнения с 5 элементами. Плюсы – это достоверные данные, которые оказываются верными в результате сравнения их с теми же 5 элементами.

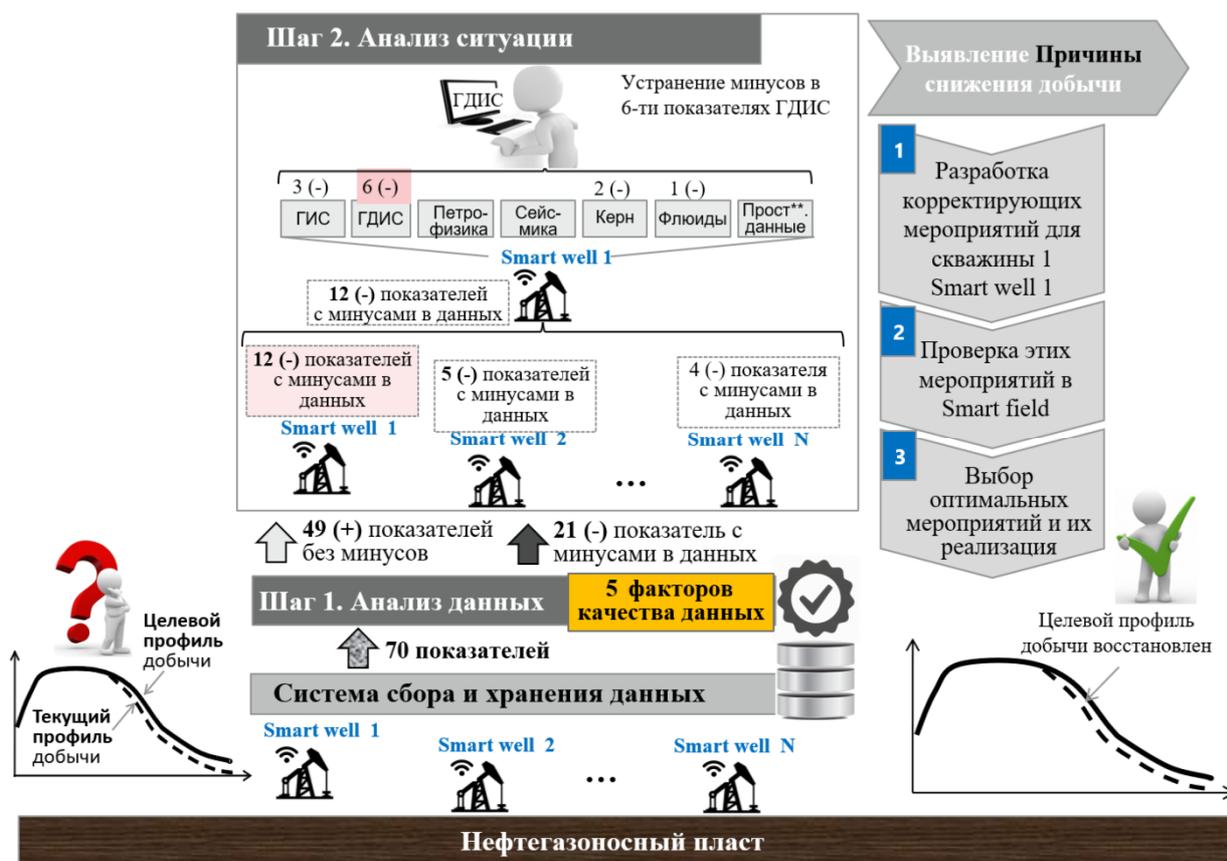


Рис. 4. Ключевые этапы методологии управления качеством данных с применением факторов логико-семантического цифрового двойника
Fig. 4. Key stages of the data quality management methodology using the factors of the logical-semantic digital twin

На первом этапе качество данных оценивается путем сравнения его с 5 элементами. В результате этого шага могут быть обнаружены данные, содержащие минусы, т. е. некачественные данные.

Анализ текущей ситуации на шаге два заключается в том, что данные с минусами сортируются по участкам месторождения или по компонентам скважины. Область с наибольшим количеством данных с минусами становится основной целью коррекции (рис. 4).

Ситуационный анализ относится к распределению данных с минусами по единицам целого [11]. В результате ситуационного анализа становится понятно, какой участок необходимо исправить и в чем причина недостижения запланированных показателей и целей [12]. Таким образом, созданная система поддержки принятия решений на первом этапе выдает ответственному специалисту по разработке месторождения список данных с минусами или ошибками. В результате реализации второго шага ответственное лицо информируется о проблемной зоне, которой соответствует наибольшее количество данных с минусами.

Ненадежные данные приводят к неправильным решениям и сводят на нет эффект от использования интеллектуальных систем, таких как интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, прогнозная аналитика и т. д. [13–15]. Управление качеством данных на основе применения логико-семантических цифровых двойников обеспечивает полезность цифровых данных. Ключевым фактором успеха цифровой трансформации компаний являются подходы, обеспечивающие качество корпоративных данных. Для этого компании внедряют новые бизнес-процессы, назначают ответственных людей и обучают персонал управлению качеством данных, поскольку надежность данных, их доступность и согласованность в различных ИТ-системах требуют комплексного подхода.

Список литературы

1. Антонов В.В., Куликов Г.Г. Семантико-математический язык описания структуры интеллектуальной системы на основе нечеткой логики // Программные продукты и системы. 2011. № 3. С. 33–35.
2. Юсупова Н.И., Еникеева К.Р. Интеллектуальная информационная поддержка принятия решений при анализе рисков чрезвычайных ситуаций и управлении ими. М.: Машиностроение, 2014. 206 с.
3. Миронов М.В., Головкин Ю.Б., Юсупова Н.И. Об алгоритмах управления по состоянию ситуации // Управление сложными техническими системами: межвуз. науч. сб. Уфа: УАИ, 1985. № 8. С. 107–111.
4. Антонов В.В., Куликов Г.Г. Метод построения математической модели предметной области // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2010. № 5 (67). С. 10–14.
5. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») / Куликов Г.Г., Сапожников А.Ю., Кузнецов А.А. и др. // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 4 (86). С. 154–160.
6. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия / А.В. Речалов, А.В. Артюхов, Г.Г. Куликов, В.Н. Новиков // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26, № 1 (95). С. 120–135. DOI: 10.54708/19926502_2022_26195120
7. Юсупова Н.И., Богданова Д.Р., Бойко М.В. Обработка слабоструктурированной информации на основе методов искусственного интеллекта. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 256 с.
8. ПНСТ 429–2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2020. 8 с.
9. Никулина Н.О., Шилина М.А., Кондратьева О.В. Проектирование автоматизированных информационных систем управления процессами: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2018. 375 с.
10. Методы и технологии проектирования программных средств для организации обработки данных / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, М.А. Шилина и др. Уфа: УГАТУ, 2018. 219 с.
11. Структурирование информационного пространства с использованием процессного подхода и семантической идентификации / Г.В. Старцев, М.А. Шилина, А.А. Бармин, О.В. Бармина // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2014. № 3. С. 203–207.

12. Основы концепции онтологического моделирования бизнес-процессов для задач принятия решений / К.А. Конев, В.В. Антонов, Д.А. Ризванов и др. // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12-1. С. 71–77. DOI: 10.17513/snt.38413

13. Конев К.А. Принятие решений в сложных социально-экономических системах // Методы менеджмента качества. 2018. № 1. С. 30–36.

14. Использование BI систем в оперативном управлении производством / Т.К. Гиндуллина, М.С. Демченко, В.Н. Капустин, А.Н. Гаффарова // 90 лет УГАТУ на службе науке, образованию и бизнесу: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Уфа: УУНиТ, 2022. С. 21–23.

15. Гелисханов И.З., Юдина Т.Н., Бабкин А.В. Цифровые платформы в экономике: сущность, модели, тенденции развития // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 6. С. 22–36. DOI: 10.18721/JE.11602

References

1. Antonov V.V., Kulikov G.G. Semantical-mathematical language of the description of structure of intellectual system on the basis of fuzzy logic. *Software & Systems*. 2011;3:33–35. (In Russ.)

2. Yusupova N.I., Enikeeva K.R. *Intellektual'naya informatsionnaya podderzhka prinyatiya resheniy pri analize riskov chrezvychaynykh situatsiy i upravlenii imi* [Intellectual information support for decision-making in the analysis of risks of emergency situations and their management]. Moscow: Mashinostroyeniye; 2014. 206 p. (In Russ.)

3. Mironov V.V., Golovkin Yu.B., Yusupova N.I. [On control algorithms based on the state of the situation]. *Upravleniye slozhnymi tekhnicheskimi sistemami: mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik* [Control of complex technical systems: interuniversity scientific collection]. Ufa: Ufa Aviation Institute. 1985;8:107–115. (In Russ.)

4. Antonov V.V., Kulikov G.G. The method of constructing the mathematical model of subject domain. *Vestnik Samara state university of economics*. 2010;5(67):10–14. (In Russ.)

5. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Zagidullin D.I. Software implementation of the expert system functions to control of design documentation in UIS engineering enterprises. *Vestnik UGATU*. 2019;23(4(86)):154–160. (In Russ.)

6. Rechkalov A.V., Artuhov A.V., Kulikov G.G., Novikov V.N. The concept of transformation of the model of planning and management processes based on the digital twin of the production system in the industrial model of a machine-building enterprise. *Vestnik UGATU*. 2022;26(1(95)):120–135. (In Russ.) DOI: 10.54708/19926502_2022_26195120

7. Yusupova N.I., Bogdanova D.R., Boyko M.V. *Obrabotka slabostrukturirovannoy informatsii na osnove metodov iskusstvennogo intellekta* [Processing of weakly structured information based on artificial intelligence methods]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye; 2016. 256 p. (In Russ.)

8. *PNST 429–2020. Umnoye proizvodstvo. Dvoyniki tsifrovyye proizvodstva. Chast' 1. Obshchiye polozheniya* [Preliminary National Standard 429–2020. Smart manufacturing. Digital manufacturing twins. Part 1. General principles]. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (In Russ.)

9. Nikulina N.O., Shilina M.A., Kondrat'yeva O.V. *Proyektirovaniye avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem upravleniya protsessami: ucheb. posobiye* [Designing secure information systems for process management: textbook]. Ufa: USATU; 2018. 375 p. (In Russ.)

10. Antonov V.V., Kulikov G.G., Shilina M.A. et al *Metody i tekhnologii proyektirovaniya programnykh sredstv dlya organizatsii obrabotki dannykh* [Methods and technologies for designing software tools for organizing data processing]. Ufa: USATU; 2018. 219 p. (In Russ.)

11. Startsev G.V., Shilina M.A., Barmin A.A., Barmina O.V. Structuring of information space of technical university using process approach and semantic identification. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO*. 2014;3:203–207. (In Russ.)

12. Konev K.A., Antonov V.V., Rizvanov D.A., Suleymanov A.K., Bakusova N.S. Fundamentals of the concept of ontological modeling of business processes for decision-making tasks. *Modern high technologies*. 2020;12-1:71–77. (In Russ.) DOI: 10.17513/snt.38413

13. Konev K.A. [Decision making in complex socio-economic systems]. *Methods of Quality Management*. 2018;1:30–36. (In Russ.)

14. Gindullina T.K., Demchenko M.S., Kapustin V.N., Gaffarova A.N. [The use of BI systems in the operational management of production]. In: *90 let UGATU na sluzhbe nauke, obrazovaniyu i*

business: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [90 years of USATU in the service of science, education and business: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference]. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2022. P. 21–23. (In Russ.)

15. Geliskhanov I.Z., Yudina T.N., Babkin A.V. Digital platforms in economics: essence, models, development trends. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2018;11(6):22–36. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.11602

Информация об авторах

Павлович Татьяна Вячеславовна, канд. техн. наук, доц. кафедры бизнес-информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; tv_pavlovich@mail.ru.

Дронь Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; elena_dron@bk.ru.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия; grisha@molniya-ufa.ru.

Information about the authors

Tatyana V. Pavlovich, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Business Informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; tv_pavlovich@mail.ru.

Elena A. Dron, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; elena_dron@bk.ru.

Grigory G. Kulikov, Technical Director, JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russia; grisha@molniya-ufa.ru.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

The article was submitted 20.09.2022

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);

- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

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

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты 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»
2023. Том 23, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.04.2023. Дата выхода в свет 28.04.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,95. Тираж 500 экз. Заказ 71/142. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.