

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021

№ 2 (54)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

Группа специальностей 05.11.00 «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы»:

- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки);
- 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

Группа специальностей 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»:

- 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);
- 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах (технические науки);
- 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);
- 05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань

Издательский дом «Астраханский университет»

2021

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Астраханского государственного университета

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021
№ 2 (54)

Редакционная коллегия

И.М. Ажмухамедов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета (главный редактор)

И.В. Аникин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ

А.А. Большаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

Ж.И. Батырканов, доктор технических наук, профессор, профессор Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова (Кыргызская Республика, г. Бишкек)

С.Н. Гончаренко, доктор технических наук, профессор, профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (г. Москва)

Л.А. Демидова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань)

И.Ю. Квятковская, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

А.Г. Кравец, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

В.Ю. Кузнецова, ассистент кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета (ответственный секретарь)

Ю.В. Литовка, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

А.М. Лихтер, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Астраханского государственного университета

А.А. Лобатый, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

В.В. Морозов, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир)

Е.В. Никульчев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (г. Москва)

В.О. Осипян, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

И.Ю. Петрова, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

А.В. Рыбаков, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета

А.В. Скрипаль, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

И.Б. Старченко, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

Ю.Ю. Тарасевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Астраханского государственного университета, заведующий лабораторией «Математическое моделирование и информационные технологии в науке и образовании»

Т.Л. Тен, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казахстан, г. Караганда)

Е.Н. Тищенко, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

М.А. Ураксеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета

С.А. Филист, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

Л.Р. Фиопова, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

В.А. Цимбал, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

Н.К. Юрков, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab (www.mbd-fr.org)

Журнал выходит 4 раза в год
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,
Издательский дом «Астраханский университет», 2021
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2021

ASTRAKHAN STATE UNIVERSITY

**PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii**

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2021

No. 2 (54)

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

Group of specialties 05.11.00 “Instrument engineering, measurement science, information and measuring devices and systems”:

05.11.01 – Instruments and measurement methods (by measurement types) (technical sciences);

05.11.16 – Information-measuring and control systems (by branches) (technical sciences);

05.11.17 – Medical instruments, systems and items (technical sciences).

Group of specialties 05.13.00 “Informatics, computer technique and control”:

05.13.01 – System analysis, information control and processing (by branches) (technical sciences);

05.13.05 – Components and devices of computational tools and control systems (technical sciences);

05.13.10 – Management in social and economic systems (technical sciences);

05.13.11 – Mathematical software and software for computing machines, computer systems and networks (technical sciences);

05.13.18 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences);

05.13.19 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan
Publishing House “Astrakhan University”
2021

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan State University

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2021
No. 2 (54)**

Editorial Board

I.M. Azhmukhamedov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security Department, Astrakhan State University
(Editor-in-Chief)

I.V. Anikin, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Security System Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KA»

A.A. Bolshakov, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

Zh. I. Batyrkanov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razza-kov (Kyrgyz Republic, Bishkek)

S.N. Goncharenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the National University of Science and Technology «MISIS» (Moscow)

L.A. Demidova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University (Ryazan)

I.Yu. Kvyatkovskaya, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of “Information Technologies and Communications” Institute of the Astrakhan State Technical University

A.G. Kravets, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

V.Yu. Kuznetsova, assistant of Information Security Department, Astrakhan State University (Executive Editor)

Yu.V. Litovka, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

A.M. Likhter, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan State University

A.A. Lobaty, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

V.V. Morozov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (Vladimir)

E.V. Nikulchev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University (Moscow)

V.O. Osipyan, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

I.Yu. Petrova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

A.V. Rybakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Astrakhan State University

A.V. Skripal, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov national research State University named after N.G. Chernyshevsky

I.B. Starchenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

Yu.Yu. Tarasevich, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Astrakhan State University, head of the laboratory «Mathematical modeling and information technologies in science and education»

T.L. Ten, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

E.N. Tishchenko, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don

M.A. Urakseev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Information and Measuring Equipment department of Ufa State Aviation Technical University

S.A. Filist, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

L.R. Fionova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

V.A. Tsimbal, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

N.K. Yurkov, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab (www.mbd-s.fr.org)

The journal is published four times a year
All materials that come to the Editorial Board of the journal
are subject to independent peer-review

© Astrakhan State University,
Publishing House “Astrakhan University”, 2021
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Е.С. Крюкова, И.Б. Паращук

Элементы теории фильтрации и теории интервальных средних
в приложении к задачам анализа качества электронных библиотек 9–15

П.В. Попов

Сравнение уровня развития логистической инфраструктуры
регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов 16–23

И.М. Ажмухамедов, В.Ю. Кузнецова

Оценка восприимчивости участника образовательного процесса
к рискам цифрового обучения в зависимости от его психологического профиля 24–30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

И.В. Вешнева, А.А. Большаков

Построение математических моделей на основе статусных функций
для разработки цифровых двойников социально-экономических систем 31–39

А.Г. Давтян, О.А. Шабалина, Н.П. Садовникова, Д.И. Потапов

Моделирование открытых обучаемых социально-экономических систем 40–47

А.А. Кожевников

Особенности моделирования при принятии решений
в сфере профессионального медицинского образования 48–53

Н.А. Баштанник, И.С. Погребняк,

А.Н. Сироткин, Т.Н. Светличкина

Моделирование аэродинамических параметров
рулевых приводов зенитной управляемой ракеты 54–61

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Е.А. Кулешова, А.А. Марухленко,

В.П. Добрица, М.О. Таныгин, А.В. Плугатарев

Вариант алгоритма генерации псевдослучайных двоичных последовательностей,
основанный на свойствах линейных клеточных автоматов 62–70

Е.А. Максимова, Н.П. Садовникова

Межсубъектное взаимодействие как источник деструктивных воздействий
на субъекте критической информационной инфраструктуры 71–80

Д.Н. Петров, А.Н. Луцко

Автоматизация электронно-печатного делопроизводства
с идентификацией и верификацией документов 81–90

И.В. Володин, М.М. Путьто, А.С. Макарян, В.Ю. Евглевский

Классификация механизмов атак и исследование методов защиты систем
с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта 91–98

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Н.К. Юрков, Р.А. Штыков

Оперативное управление компрессорными станциями
для изменения прокачки газа в газопроводе 99–105

Е.А. Гаверлина, В.В. Вельтищев

Управление ориентацией высокоманевренного необитаемого
подводного аппарата с использованием кватернионов 106–112

А.А. Кабанов, В.А. Крамарь, О.А. Крамарь

Система 3D-зрения для подводного робототехнического комплекса 113–125

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 126

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

E.S. Kryukova, I.B. Parashchuk

Elements of the filtering theory and the theory of interval averages
in the application to the problems of analyzing the quality of electronic libraries..... 9–15

P.V. Popov

Comparison of the level of development of the logistics infrastructure
of the regions of the Siberian and Far Eastern Federal Districts..... 16–23

I.M. Azhmukhamedov, V.Yu. Kuznetsova

Assessment of the passenger of a participant of the educational process
to the risks of digital learning depending on his psychological profile 24–30

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

I.V. Veshneva, A.A. Bolshakov

Construction of mathematical models based on status functions
for the development of digital twins of socio-economic systems 31–39

A.G. Davtyan, O.A. Shabalina, N.P. Sadovnikova, D.I. Potapov

Modeling open learnable socio-economical systems 40–47

A.A. Kozhevnikov

Modeling features in decision-making in the field of professional medical education..... 48–53

N.A. Bashtannik, I.S. Pogrebnyak, A.N. Sirotkin, T.N. Svetlichkina

Modelling of aerodynamic parameters
of steering drives of the anti-aircraft guided missile 54–61

INFORMATION SAFETY AND INFORMATION PROTECTION

***E.A. Kuleshova, A.L. Marukhlenko,
V.P. Dobritsa, M.O. Tanygin, A.V. Plugatarev***

A variant of the algorithm for generating pseudo-random binary
sequences based on the properties of linear cellular automata..... 62–70

E.A. Maksimova, N.P. Sadovnikova

Intersubjective interaction as a source of destructive influences
on the subject of critical information infrastructure..... 71–80

D.N. Petrov, A.N. Lutsko

Automation of electronic-printing office work
with the documents identification and verification 81–90

I.V. Volodin, M.M. Putyato, A.S. Makaryan, V.Yu. Evglevsky

Classification of attack mechanisms and research of protection methods
for systems using machine learning and artificial intelligence algorithms 91–98

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

N.K. Yurkov, R.A. Shtykov

Operational control of compressor stations
to change gas pumping in the gas pipeline 99–105

E.A. Gavrilina, V.V. Veltishev

Quaternion-based attitude control
of highly maneuverable unmanned underwater vehicle 106–112

A.A. Kabanov, V.A. Kramar, O.A. Kramar

3D vision system for underwater robot 113–125

RULES FOR THE AUTHORS 126

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.54.2.009-015
УДК 004:9

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ И ТЕОРИИ ИНТЕРВАЛЬНЫХ СРЕДНИХ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК

Статья поступила в редакцию 26.03.2021, в окончательном варианте – 10.04.2021.

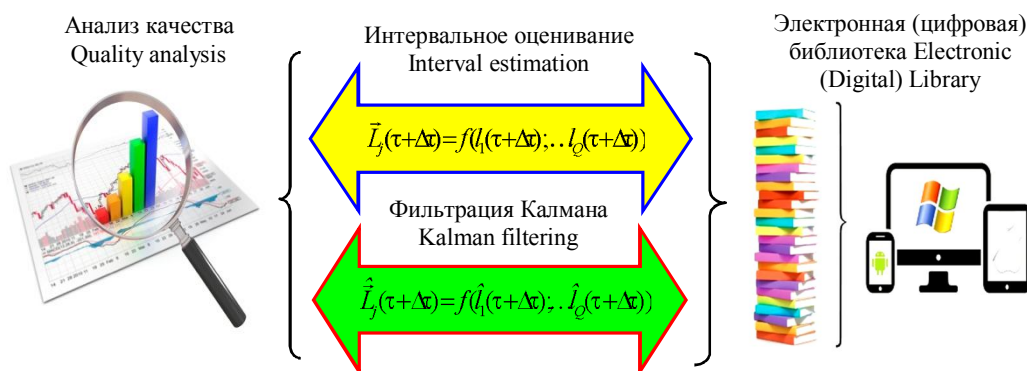
Крюкова Елена Сергеевна, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъютант, ORCID 0000-0001-7482-056, e-mail: e.krukova69@yandex.ru

Паращук Игорь Борисович, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru

Охарактеризованы роль и место электронных библиотек, как одного из ключевых элементов фундамента единого информационного пространства России. Показаны особенности, обуславливающие сложность (уровень) методов и средств анализа состояния и качества электронных библиотек и накладывающие все более высокие требования к алгоритмам оценивания качества программно-аппаратных средств и цифрового контента. Описаны некоторые ключевые аспекты формулировки и наполнения содержанием базовых этапов методики анализа качества электронных библиотек. Показано, что эти аспекты имеют существенное значение в рамках получения интервальных частных (нижней и верхней) оценок качества и обобщенной оценки качества систем такого класса с использованием методов теории интервальных средних. Предложен подход, сочетающий методы теории интервальных средних и традиционные методы калмановской фильтрации (экстраполяции) для анализа качества электронных библиотек. Практическая реализация методики позволит получать оценочные значения конкретных параметров системы на временных интервалах, что позволит повысить достоверность анализа качества и адекватность управления структурой, параметрами и режимами функционирования объектов такого класса.

Ключевые слова: электронная библиотека, показатель качества, анализ, оценивание, фильтрация, интервальные средние, качество, параметр, метод, алгоритм, контент, требования, управление

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Методы фильтрации Калмана и методы теории интервальных средних в интересах оценки качества электронных библиотек
Kalman filtering methods and methods of the theory of interval averages in the interests of evaluating the quality of an electronic libraries

ELEMENTS OF THE FILTERING THEORY AND THE THEORY OF INTERVAL AVERAGES IN THE APPLICATION TO THE PROBLEMS OF ANALYZING THE QUALITY OF ELECTRONIC LIBRARIES

The article was received by the editorial board on 26.03.2021, in the final version – 10.04.2021.

Kryukova Elena S., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation, postgraduate student, ORCID 0000-0001-7482-056, e-mail: e.kkrukovaa69@yandex.ru

Parashchuk Igor B., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru

The role and place of electronic libraries as one of the key elements of the foundation of the unified information space of Russia are characterized. The features that determine the complexity (level) of methods and tools for analyzing the state and quality of electronic libraries and impose increasingly high requirements on algorithms for evaluating the quality of software and hardware and digital content are shown. Some key aspects of the formulation and content filling of the basic stages of the methodology for analyzing the quality of electronic libraries are described. It is shown that these aspects are essential in the framework of obtaining interval partial (lower and upper) quality estimates and generalized quality estimates of systems of this class using the methods of the theory of interval averages. An approach combining the methods of the theory of interval averages and traditional methods of Kalman filtering (extrapolation) is proposed to analyze the quality of electronic libraries. The practical implementation of the methodology will allow us to obtain estimated values of specific system parameters at time intervals, which will increase the reliability of the quality analysis and the adequacy of the management of the structure, parameters and modes of operation of objects of this class.

Keywords: electronic library, quality indicator, analysis, evaluation, filtering, interval averages, quality, parameter, method, algorithm, content, requirements, management

Введение. Электронные библиотеки (ЭБ) завоевывают все большую популярность как в системе образования (включая самообразование), сфере IT-индустрии, так и в иных сферах народного хозяйства. Эти современные информационно-справочные и информационно-поисковые технологии, а также реализующие их распределенные системы, обладающие унифицированным интерфейсом и возможностью доступа пользователей к электронному контенту через глобальную сеть. Причем эти IT-объекты имеют все классификационные признаки, позволяющие отнести их к сложным управляемым техническим (информационно-техническим) системам [7]. Создание национальных ЭБ наработывает на развитие современной науки и образования, являясь, по сути, одним из ключевых элементов фундамента единого информационного пространства России [6, 10–12].

Электронные библиотеки предназначены для хранения и обработки различного цифрового контента, их количество и объем содержимого неуклонно растет, технологии хранения контента активно развиваются во всем мире, но наибольшее распространение инновационные решения в рамках развития ЭБ получили у нас в стране и на американском континенте [13–18]. Требования к современному цифровому контенту предопределяют высокий уровень требований к архитектуре ЭБ, к алгоритмам управления ими.

Это, в свою очередь, накладывает определенные обязательства на сложность (уровень) методов и средств анализа состояния и качества ЭБ, накладывает более высокие требования к алгоритмам оценивания качества программно-аппаратных средств ЭБ в интересах управления параметрами, структурой и режимами работы систем такого класса.

Иными словами, речь идет о поиске новых современных, достоверных и оперативных методологических инструментов анализа качества ЭБ. Существующие методологические подходы, ориентированные на анализ технического состояния, качества и эффективности подобных сложных информационных систем, традиционно используют вероятностную меру и комплексные (интегральные) показатели качества [9], получаемые, в частности, на основе математической свертки. При этом анализ качества связан с интегрированием (по пороговым значениям существенных параметров систем такого класса) совместных плотностей распределения вероятностей, составляющих физическую сущность этих показатели качества (ПК). Однако при анализе комплексных (интегральных) ПК ЭБ исследователи вынуждены использовать процедуры непосредственного Q -кратного интегрирования совместной плотности распределения вероятностей, характеризующих эти ПК. Это связано с тем, что текущие совместные плотности распределения вероятностей имеют размерность $Q \times S \times T$, где Q – количество анализируемых ПК ЭБ, S – число состояний этих ПК, а T – число временных отсчетов оценивания показателей качества. Очевидно, что процесс

Q -кратного интегрирования совместной плотности распределения вероятностей размерности $Q \times S \times T$ трудоемок и имеет большую вычислительную сложность из-за большой математической размерности решаемой задачи.

С учетом рассмотренных трудностей решения задач анализа комплексных (интегральных) ПК сложных управляемых технических (информационных) систем, на наш взгляд, имеет право на жизнь гипотеза о рациональности применения методологических подходов, ориентированных на интервальное оценивание качества. Иными словами, на использование методов и алгоритмов, ориентированных как на традиционные методы фильтрации, так и на анализ частных и комплексных ПК ЭБ и параметров процесса их функционирования на определенном временном интервале. Способу решения задач подобного класса посвящена данная статья.

Постановка задачи исследования. Известно, что задачи оценивания традиционно решаются на основе линейной и нелинейной фильтрации Калмана, а задачи интервального контроля для систем подобного класса могут, на наш взгляд, быть успешно решены с использованием методов теории интервальных средних [1, 2, 5].

При этом сочетание методов обработки статистики интервальных средних и алгоритмов линейной и нелинейной фильтрации, позволяет, в отличие от традиционных методов и алгоритмов, упростить вычисления и существенно снизить размерность задачи оптимального оценивания частных и комплексного (интегрального) показателей качества функционирования ЭБ на определенном временном интервале.

С точки зрения формулировки методологических аспектов анализа качества ЭБ, две ключевые стадии (этапы) методики оценивания ПК ЭБ на основе постулатов теории интервальных средних, могут иметь следующий вид.

Первая стадия – получение исходных данных, т.е. данных наблюдения либо результатов математического моделирования процесса смены состояний ПК ЭБ на основе непрерывных марковских цепей. Математическая модель такого типа записывается в форме разностных стохастических уравнений и позволяет снизить сложность последующих вычислений и свести размерность задачи анализа к размерности $Q \times N \times t$, где t – временной интервал анализа ПК ЭБ. Иными словами, на данной стадии вместо процедуры непосредственного Q -кратного интегрирования совместной плотности распределения вероятностей размерности $Q \times N \times t$ реализуются процедура сбора данных наблюдения или процедура моделирования [3, 4].

Вторая стадия – определение оценочных значений нижнего и верхнего средних уровней качества ЭБ. Фактически это процедура вычисления нижнего и верхнего средних значений частных ЭБ на интервале времени $(t + \Delta t)$ с использованием методов теории интервальных средних.

Рассмотренные стадии методики оценивания ПК ЭБ описывают две глобальные многошаговые процедуры интервального оценивания частных ПК функционирования ЭБ на определенном временном интервале, основываясь на методах теории интервальных средних и алгоритмах оптимальной фильтрации (экстраполяции).

Методологические аспекты анализа качества электронных библиотек на основе методов теории фильтрации и статистики интервальных средних. Предложенный подход позволяет осуществить текущую пошаговую фильтрацию (экстраполяцию) ПК ЭБ и вычисление оценочных значений нижнего и верхнего средних уровней качества (средних уровней значений частных ПК) ЭБ на интервале времени $(t + \Delta t)$ на основе алгоритмов теории интервальных средних.

При этом временной интервал оценивания $(t + \Delta t)$ состоит из конечного множества T непрерывных отсчетов $(\tau + \Delta \tau)$ времени наблюдения (моделирования):

$$(t + \Delta t) = \{(\tau_1 + \Delta \tau) + (\tau_2 + \Delta \tau) + \dots + (\tau_T + \Delta \tau)\}. \quad (1)$$

Рассмотрим детально содержание этапов интервального оценивания ПК ЭБ.

Начальный этап интервального оценивания частных показателей качества функционирования ЭБ – сбор статистических данных о значениях ПК ЭБ:

$$\vec{L}(\tau + \Delta \tau) = f(l_1(\tau + \Delta \tau); l_2(\tau + \Delta \tau); \dots l_i(\tau + \Delta \tau); \dots l_Q(\tau + \Delta \tau)), \quad (2)$$

где $\vec{L}(\tau + \Delta \tau)$ – вектор показателей качества функционирования ЭБ, характеризующих ее конкретные свойства (например, доступность пользователей к цифровому контенту) и изменяемый (наблюдаемый, моделируемый) на $(\tau + \Delta \tau)$ -ом временном отрезке функционирования ЭБ; $l_i(\tau + \Delta \tau)$ – i -ый ($i = 1, \dots, Q$) частный показатель качества функционирования ЭБ в составе вектора ПК ЭБ $\vec{L}(\tau + \Delta \tau)$.

Статистика собирается за период наблюдения или шаг моделирования, на $(\tau+\Delta\tau)$ -ом временном отрезке функционирования ЭБ, с использованием математической, имитационной модели или на основе данных наблюдения, поступающих от сенсоров и датчиков реальной ЭБ.

Этап фильтрации – оптимальная по критерию минимального среднего квадрата ошибки (МСКО) калмановская фильтрация (экстраполяция) значений ПК ЭБ. Причем фильтрация (экстраполяция) осуществляется для временного отрезка, характеризующего период наблюдения или шаг моделирования (т.е., на $(\tau+\Delta\tau)$ -ом временном отрезке функционирования ЭБ).

С учетом того, что процесс смены состояний ПК ЭБ моделируется непрерывной марковской цепью и может быть аналитически описан линейным векторным разностным уравнением и уравнением наблюдения [3, 4], оптимальные (в смысле МСКО) оценки индикатора $\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau)$ состояния конкретного i -го ПК ЭБ $l_i(\tau+\Delta\tau)$ могут быть получены в результате решения рекуррентных уравнений одноинтервальной (за интервал времени $(\tau+\Delta\tau)$) экстраполяции [8, 9]:

$$\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau) = \Lambda_i^m(\tau+\Delta\tau, \tau) \hat{\Theta}_i(\tau, \tau-\Delta\tau) + K_i(\tau+\Delta\tau, \tau) \times [\bar{z}_i(\tau) - H_i(\tau) \hat{\Theta}_i(\tau, \tau-\Delta\tau)], \quad (3)$$

где $\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau)$ – вектор оценочных значений индикатора состояния конкретного i -го ПК ЭБ $l_i(\tau+\Delta\tau)$;

$\Lambda_i^m(\tau+\Delta\tau, \tau)$ – транспонированная квадратная матрица (порядка m) плотностей вероятностей перехода λ_{rv} конкретного i -го ПК ЭБ за время $(\tau+\Delta\tau)$ из состояния r в состояние v ;

$\hat{\Theta}_i(\tau, \tau-\Delta\tau)$ – вектор оценочных значений индикаторов состояния конкретного i -го ПК ЭБ l_i на предыдущем $(\tau, \tau-\Delta\tau)$ временном интервале;

$\bar{z}_i(\tau)$ – вектор возможных наблюдаемых значений конкретного i -го ПК ЭБ l_i на всем интервале оценивания (τ) ;

$H_i(\tau)$ – диагональная квадратная матрица (порядка m) наблюдаемых значений конкретного i -го ПК ЭБ l_i ;

$K_i(\tau+\Delta\tau, \tau)$ – коэффициент усиления одноинтервального (для интервала $(\tau+\Delta\tau)$) фильтра Калмана, определяемый для конкретного i -го ПК ЭБ l_i в соответствии с выражением:

$$K_i(\tau+\Delta\tau, \tau) = \Lambda_i^m(\tau+\Delta\tau, \tau) P_i(\Delta\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau, \tau) H_i(\tau) \times \\ \times [H_i(\tau) P_i(\Delta\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau, \tau) H_i(\tau) + V_{i,\omega}(\tau)]^{-1}, \quad (4)$$

где $P_i(\Delta\hat{\Theta}_i(\tau+\Delta\tau, \tau))$ – матрица априорных дисперсий ошибок оценивания, определяемая для следующего интервала $(\tau+\Delta\tau)$ фильтрации конкретного i -го показателя качества ЭБ l_i ; $V_{i,\omega}(\tau)$ – матрица шумов ω оценивания [8].

В итоге, на выходе этапа оптимальной по критерию МСКО калмановской фильтрации (экстраполяции), получим вектор оценочных значений ПК ЭБ на интервале времени $(\tau+\Delta\tau)$:

$$\hat{L}(\tau+\Delta\tau) = f(\hat{l}_1(\tau+\Delta\tau); \hat{l}_2(\tau+\Delta\tau); \dots; \hat{l}_i(\tau+\Delta\tau); \dots; \hat{l}_Q(\tau+\Delta\tau)). \quad (5)$$

Этап определения интервальных средних для частных ПК ЭБ – вычисление интервального оценочного нижнего $\hat{l}_i(t+\Delta t)$ и верхнего $\bar{l}_i(t+\Delta t)$ средних уровней значений каждого из частных ПК ЭБ на интервале времени оценивания $(t+\Delta t)$ на основе статистической обработки оценочных значений этих ПК за все непрерывные отсчеты (периоды) наблюдения или шаги моделирования $(\tau+\Delta\tau)$, составляющие в сумме содержание шага оценивания $(t+\Delta t)$, как определено выражением (1).

Тем самым на этом этапе, на основе статистического анализа измеряемых (наблюдаемых, моделируемых) параметров и с использованием методов теории интервальных средних находят точный нижний $\hat{l}_i(t+\Delta t)$ и верхний $\bar{l}_i(t+\Delta t)$ средние уровни качества – средние значения i -ых показателей качества ЭБ l_i и обобщенного ПК ЭБ в целом на интервале времени $(t+\Delta t)$.

Точный нижний и верхний средние уровни качества – средние значения i -ых показателей качества ЭБ l_i вычисляются на основе предположения о том, что любой показатель (коэффициент)

качества ЭБ l_i может рассматриваться как признак (идентифицированный параметр системы), а функции $\hat{l}_i(t + \Delta t)$ и $\bar{l}_i(t + \Delta t)$ как нижнее и верхнее средние этого признака [2], т.е.

$$\hat{l}_i(t + \Delta t) = \underline{M}(\hat{l}_i), \quad \bar{l}_i(t + \Delta t) = \overline{M}(\hat{l}_i), \quad (6)$$

где $\underline{M}(\hat{l}_i)$ и $\overline{M}(\hat{l}_i)$ – нижние и верхние средние, причем при полном отсутствии сведений $\hat{l}_i(t + \Delta t) = 0$ и $\bar{l}_i(t + \Delta t) = 1$.

Для вычисления нижнего среднего значения уровня качества ЭБ $\hat{\underline{L}}(t + \Delta t)$ по имеющимся средним уровням качества – средним оценочным значениям i -ых показателей качества ЭБ $\hat{l}_i(t + \Delta t)$ и $\bar{l}_i(t + \Delta t)$, $i = 1, 2, \dots, Q$, необходимо определить точную нижнюю границу (наименьшую из всех верхних) [2]:

$$\hat{\underline{L}}(t + \Delta t) = \sup_{c, c_i, d_i} (c_0 + \sum_{i=1}^Q (c_i \hat{l}_i(t + \Delta t) - d_i \bar{l}_i(t + \Delta t))), \quad (7)$$

где c, c_i – нижние средние значения идентифицированного (наблюдаемого, измеренного) i -го показателя качества ЭБ l_i ; d_i – верхние средние значения идентифицированного i -го показателя качества ЭБ l_i (неотрицательные вещественные параметры), а c_0 – произвольный вещественный параметр.

Для вычисления верхнего среднего значения уровня качества ЭБ $\hat{\bar{L}}(t + \Delta t)$ по имеющимся средним уровням качества – средним оценочным значениям i -ых показателей качества ЭБ $\hat{l}_i(t + \Delta t)$ и $\bar{l}_i(t + \Delta t)$, необходимо определить точную верхнюю границу качества системы (наибольшую из всех нижних) [2]:

$$\hat{\bar{L}}(t + \Delta t) = \inf_{c, c_i, d_i} (c_0 + \sum_{i=1}^Q (c_i \bar{l}_i(t + \Delta t) - d_i \hat{l}_i(t + \Delta t))). \quad (8)$$

Заключительный этап методики анализа качества ПК ЭБ, основанной на применении методов теории фильтрации и теории интервальных средних – вычисление интервальных оценок обобщенного ПК ЭБ с учетом результатов интервального анализа (идентификации) ПК ЭБ. Здесь определяются интервальные оценки нижних $\hat{\underline{L}}_{об}(t + \Delta t)$ и верхних $\hat{\bar{L}}_{об}(t + \Delta t)$ значений обобщенного ПК ЭБ с учетом результатов интервальных оценок (идентификации) ее частных показателей качества.

С учетом того, что при оценивании качества в рамках теории интервальных средних не используется информация о независимости ПК ЭБ, важным аспектом методологии анализа является возможность применить математическое соотношение для систем с мультипликативным обобщенным показателем (коэффициентом) качества [2].

Это соотношение характеризует функцию взаимосвязи интегральных (комплексных) ПК ЭБ с частными i -ми ($i = 1, \dots, Q$) показателями качества и позволяет получать точные нижнее и верхнее оценочные значения обобщенных показателей качества ЭБ:

$$\hat{\underline{L}}_{об}(t + \Delta t) = \prod_{i=1}^Q \hat{l}_i(t + \Delta t); \quad \hat{\bar{L}}_{об}(t + \Delta t) = \min_{i=1, \dots, Q} \bar{l}_i(t + \Delta t). \quad (9)$$

В качестве реального примера для формулировки и реализации процедур анализа качества ЭБ, можно рассмотреть формальную запись вектора ПК $\bar{L}_{свр}(\tau + \Delta \tau)$, характеризующих, например, своевременность предоставления услуг ЭБ пользователям. Для этого может быть использовано выражение, где в качестве l_i – элементов этого вектора, выступают конкретные ПК:

$$\bar{L}_{свр}(\tau + \Delta \tau) = [t_{дост}(\tau + \Delta \tau), t_{ож}(\tau + \Delta \tau), t_{проб}(\tau + \Delta \tau), G_{свр}(\tau + \Delta \tau)]^T, \quad (10)$$

где $t_{дост}(\tau + \Delta \tau)$ – время доступа легального (авторизованного) пользователя к запрашиваемому контенту (информационному ресурсу) ЭБ на интервале времени $(\tau + \Delta \tau)$; $t_{ож}(\tau + \Delta \tau)$ – время ожидания доступа легального (авторизованного) пользователя к запрашиваемому контенту (информационному ресурсу) ЭБ; $t_{проб}(\tau + \Delta \tau)$ – время пребывания запрашиваемого контента

(информационного ресурса) в системе; $G_{свр}(\tau + \Delta\tau)$ – коэффициент своевременности предоставления услуг (контента, информационного ресурса), определяемый как отношение реального времени ожидания доступа к конкретной услуге к суммарному времени ожидания всех услуг. Тем самым выражение (10) описывает пример вектора ПК (векторного ПК) $\vec{L}_{свр}(\tau + \Delta\tau)$ ЭБ, характеризующих ее способность обеспечивать доступ пользователей к запрашиваемым информационным ресурсам и предоставление им требуемого перечня услуг в установленные сроки или в реальном масштабе времени. Примером ПК, например, характеризующих затраты различных ресурсов (временных, вычислительных, финансовых, частотных, человеческих (персонал), ресурсов систем хранения данных и т.д.), используемых для реализации процесса функционирования ЭБ, может выступать, допустим, $t_{обр}(\tau + \Delta\tau)$ – время обработки системой единичного запроса легального (авторизованного) пользователя к конкретному контенту (информационному ресурсу) ЭБ.

Тем самым, с помощью выражений (1)–(10) рассмотрены некоторые ключевые аспекты методологии анализа качества ЭБ, которые имеют существенное значение в рамках получения интервальных частных (нижней и верхней) оценок качества и обобщенной оценки качества систем такого класса с использованием методов теории фильтрации и теории интервальных средних.

Заключение. Таким образом, использование при реализации данных методов, этапов и аналитических выражений единого критерия (МСКО) оценки как линейно, так и нелинейно изменяющихся ПК элементов и процессов, реализуемых ЭБ на $(\tau + \Delta\tau)$ -м временном интервале, позволяет унифицировать алгоритмы интервальной оценки качества систем такого класса, создавая тем самым предпосылки для унификации алгоритмов управления ЭБ.

Рассмотренные особенности применения методов теории фильтрации и теории интервальных средних позволят учесть все сопутствующие факторы при формулировке методики анализа качества ЭБ, а полученные при практической реализации данных методов интервальные результаты анализа – оценочные значения параметров системы на конкретных временных интервалах, позволят повысить достоверность анализа качества ЭБ, что, в конечном итоге, позволит повысить адекватность управления структурой, параметрами и режимами работы систем такого класса.

Библиографический список

1. Боран-Кешишьян А. Л. Положения теории интервальных средних, применительно к анализу надежности технических средств сложных систем при независимых по надежности элементах / А. Л. Боран-Кешишьян, Е. В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. – 2014. – № 1 (73). – С. 38–42.
2. Гуров С. В. Надежность систем при неполной информации / С. В. Гуров, Л. В. Уткин. – Санкт-Петербург : Любавич, 1999. – 160 с.
3. Крюкова Е. С. Модель функционирования электронной библиотеки для анализа ее качества и информационной безопасности / Е. С. Крюкова // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. – 2020. Сер. 16, вып. № 9–10 (147–148). – С. 16–22.
4. Крюкова Е. С. Математическая модель, предназначенная оценки качества электронной библиотеки: синтез числа градаций пространства состояний / Е. С. Крюкова, И. Б. Парашук // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49) – С. 121–131.
5. Кузнецов В. П. Интервальные статистические модели / В. П. Кузнецов. – Москва : Радио и связь, 1991. – 352 с.
6. Матвеев М. Ю. Национальные библиотеки: на пути к цифровому будущему / М. Ю. Матвеев // Вестник Санкт-Петербургского государственного института культуры. – 2017. – № 2 (31). – С. 88–95.
7. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 7.0.96 – 2016. Электронные библиотеки. Основные виды. Структура. Технология формирования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 13 с.
8. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мэлс. – Москва : Связь, 1976. – 496 с.
9. Терентьев В. М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В. М. Терентьев, И. Б. Парашук. – Санкт-Петербург : ВАС, 1995. – 195 с.
10. Шаповалова Г. М. Информационное общество: от цифровых архивов к цифровому культурному наследию / Г. М. Шаповалова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5–6. – С. 177–181.
11. Besser H. The Past, Present, and Future of Digital Libraries. A Companion to Digital Humanities / H. Besser // A Companion to Digital Humanities. – Blackwell Publishing Ltd., 2004. – P. 557–575.
12. Isah A. Digital Libraries: Analysis of Delos Reference Model and 5S Theory / A. Isah, B. C. Serema, A. Mutshewa, L. Kenosi // Journal of Information Science Theory and Practice. – 2013. – № 1 (4). – P. 38–47.
13. Lanagan J. Video digital libraries: contributive and decentralized / J. Lanagan, A. F. Smeaton // International Journal on Digital Libraries. – 2012. – № 12 (4). – P. 159–178.

14. Papy F. *Digital Libraries* / F. Papy. – 1st ed. – Amsterdam, Netherlands : ISTE Press-Elsevier. 2016. – 152 p.
15. Pomerantz J. The digital library as place / J. Pomerantz, G. Marchionini // *Journal of Documentation*. – 2007. – № 63 (4). – P. 505–533.
16. Reilly B. F. Jr. Rethinking the National Library / B. F. Jr. Reilly // *American Libraries*. – 2016. – Vol. 47, iss. 11–12. – 30 p.
17. Russian Association of Digital Libraries. – 2020. – Режим доступа: <http://www.aselibrary.ru/index.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 17.01.2020).
18. Witten I. H. *How to Build a Digital Library* / I. H. Witten, D. Bainbridge, D. M. Nichols. – 2nd ed. – Waltham, USA : Morgan Kaufmann, 2009. – 656 p.

References

1. Boran-Keshishyan A. L., Heckert E. V. Polozeniya teorii intervalnykh srednikh, primenitelno k analizu nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv slozhnykh sistem pri nezavisimyykh po nadezhnosti elementakh [Propositions of the theory of interval averages, applied to the analysis of the reliability of technical means of complex systems in elements independent of reliability]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Operation of sea transport], 2014, no. 1 (73), pp. 38–42.
2. Gurov S. V., Utkin L. V. *Nadezhnost sistem pri nepolnoy informatsii* [Reliability of systems with incomplete information]. Saint Petersburg, Lyubavich Publ., 1999. 160 p.
3. Kryukova E. S. Model funktsionirovaniya elektronnoy biblioteki dlya analiza yeye kachestva i informatsi-onnoy bezopasnosti [A model of the functioning of an electronic library for analyzing its quality and information security]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Tekhnicheskkiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defense Technology Issues. Technical means of countering terrorism], 2020, ser. 16, issue 9–10 (147–148), pp. 16–22.
4. Kryukova E. S., Parashchuk I. B. Matematicheskaya model, prednaznachennaya otsenki kachestva elektronnoy biblioteki: sintez chisla gradatsiy prostranstva sostoyaniy [A mathematical model designed to assess the quality of an electronic library: synthesis of the number of gradations of the state space]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 121–131.
5. Kuznetsov V. P. *Intervalnyye statisticheskkiye modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio I svyaz Publ., 1991. 352 p.
6. Matveev M. Yu. Natsionalnyye biblioteki: na puti k tsifrovomu budushchemu [National libraries: on the way to the digital future]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta kultury* [Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Culture], 2017, no. 2 (31), pp. 88–95.
7. *Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii GOST R 7.0.96 – 2016. Elektronnyye biblioteki. Osnovnyye vidy. Struktura. Tekhnologiya formirovaniya* [National Standard of the Russian Federation GOST R 7.0.96 – 2016. Electronic libraries. The main types. Structure. Technology of formation]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 13 p.
8. Sage E., Mels J. *Teoriya otsenivaniya i yeye primeneniye v svyazi i upravlenii* [Theory of evaluation and its application in communication and management]. Moscow, Svyaz Publ., 1976. 496 p.
9. Terentyev V. M., Parashchuk I. B. *Teoreticheskkiye osnovy upravleniya setyami mnogokanalnoy radioosvyazi* [Theoretical foundations of multichannel radio communication network management]. Saint Petersburg, VAS, 1995. 195 p.
10. Shapovalova G. M. Informatsionnoye obshchestvo: ot tsifrovykh arkhivov k tsifrovomu kulturnomu naslediyu [Information society: from digital archives to digital cultural heritage]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2016, no. 5–6. pp. 177–181.
11. Besser H. The Past, Present, and Future of Digital Libraries. *A Companion to Digital Humanities*. Blackwell Publishing Ltd., 2004, pp. 557–575.
12. Isah A., Serema B. C., Mutshewa A., Kenosi L. Digital Libraries: Analysis of Delos Reference Model and 5S Theory. *Journal of Information Science Theory and Practice*, 2013, no. 1 (4), pp. 38–47.
13. Lanagan J., Smeaton A. F. Video digital libraries: contributive and decentralized. *International Journal on Digital Libraries*, 2012, no. 12 (4), pp. 159–178.
14. Papy F. *Digital Libraries*. 1st ed. Amsterdam, Netherlands, ISTE Press-Elsevier, 2016. 152 p.
15. Pomerantz J., Marchionini G. The digital library as place. *Journal of Documentation*, 2007, no. 63 (4), pp. 505–533.
16. Reilly B. F. Jr. Rethinking the National Library. *American Libraries*, 2016, vol. 47, iss. 11–12. 30 p.
17. *Russian Association of Digital Libraries 2020*. Available at: <http://www.aselibrary.ru/index.html> (accessed 17.01.2020).
18. Witten I. H., Bainbridge D., Nichols D. M. *How to Build a Digital Library*. 2nd ed. Waltham, USA, Morgan Kaufmann, 2009. 656 p.

УДК 004.021

СРАВНЕНИЕ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНОВ СИБИРСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОКРУГОВ*Статья поступила в редакцию 11.05.2021, в окончательном варианте – 19.05.2021.*

Попов Павел Владимирович, Волжский филиал Волгоградского государственного университета, 404133, Российская Федерация, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. 40 лет Победы, 11. кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-3248-2599, e-mail: donpascha@yandex.ru

Важность логистической инфраструктуры в построении инновационного пути развития экономики Российской Федерации отражена в основополагающих стратегиях и концепциях развития страны. Существенное влияние она также оказывает и на инвестиционную привлекательность регионов, устранение дисбаланса в их транспортной обеспеченности, интеграции субъектов РФ в единое транспортное пространство страны и мира. Для сравнения уровня развития логистической инфраструктуры регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов в работе был использован факторный анализ. Способ вращения – варимакс с нормализацией Кайзера. В результате проведенного исследования данных факторной структуры шести показателей логистической инфраструктуры после вращения было выявлено наличие двух факторов, позволяющих описать представленные характеристики. К первому фактору была отнесена деятельность автомобильного и железнодорожного транспорта в области грузовых перевозок, ко второму – количество предприятий транспорта, хранения, финансов, а также перевозки грузов воздушным транспортом. Объектная диаграмма, построенная на основе собственных нагрузок показателей в факторе, позволила разделить все субъекты РФ на три группы по степени выраженности атрибута. В первую группу были отнесены регионы со сбалансированным взаимодействием между наземной инфраструктурой и количеством предприятий транспорта, хранения, финансов. Ко второму и третьему – с большей выраженностью первого и второго фактора, соответственно. В общем, результаты показали существенный дисбаланс в развитии логистической инфраструктуры между регионами Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Ключевые слова: система управления, логистическая инфраструктура, индекс эффективности логистики, факторный анализ, объектная диаграмма, федеральный округ

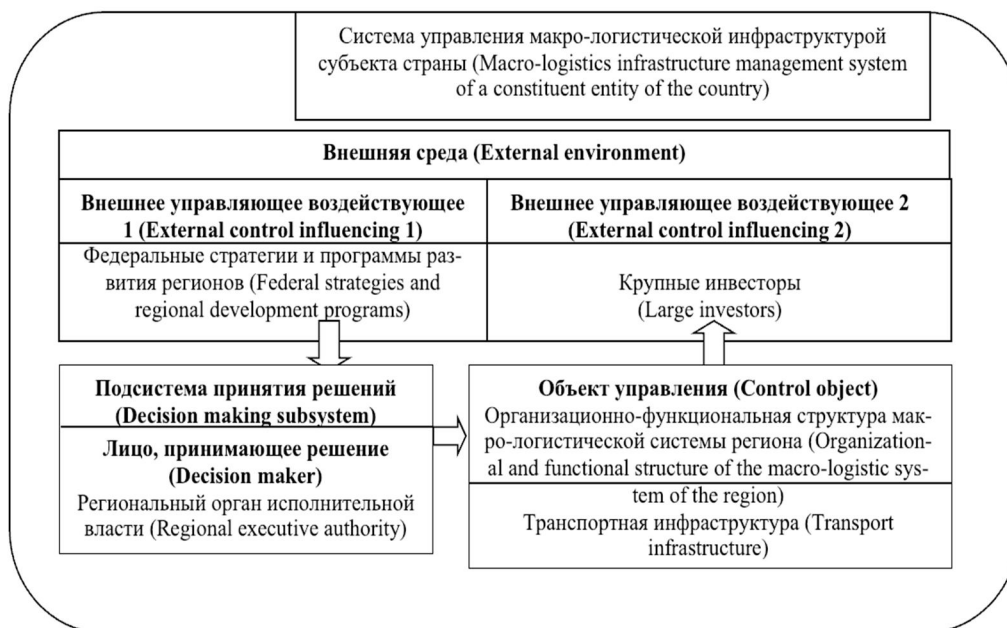
COMPARISON OF THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF THE LOGISTICS INFRASTRUCTURE OF THE REGIONS OF THE SIBERIAN AND FAR EASTERN FEDERAL DISTRICTS*The article was received by the editorial board on 11.05.2021, in the final version – 19.05.2021.*

Popov Pavel V., Volgograd State University (Branch in Volzhsky), 11 40 let Pobedy St., Volzhsky, 404133, Russian Federation
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-3248-2599, e-mail: donpascha@yandex.ru

In the article a model for the formation of the optimal region transport infrastructure is proposed. The model is based on the task of finding the optimal location of vehicle fleets and terminals on the basis of the formed network of distribution and sorting warehouses and the demand uncertainty on the part of goods consumers served by this warehouse infrastructure. The proposed model allows not only to determine the optimal location of transport infrastructure elements in the territory of the subject of the Russian Federation, but also to determine their capacity. The optimization model is based on minimizing the total costs associated with maintaining fleets, promoting goods throughout the network, driving empty motor vehicles, and handling goods. In order to consider, the probabilistic consumer demand, indirect methods of stochastic programming are used that implemented in two steps. At the first step, constraints of the stochastic problem are formed based on certain requirements for fulfilling random restrictions. At the second step, passing to solving the deterministic equivalents of original stochastic problem. We consider a model for satisfying demand on average and with a given probability. To build a model considering the satisfaction of demand on average, M-setting (mathematical expectation) of constraints is used, satisfaction of demand with a given probability is P-setting (with probability constraints). The application of the proposed settings in the stochastic task of optimizing the transport infrastructure of the region will contribute to a more economical solution in the conditions of a given level of customer service.

Keywords: management system, logistics infrastructure, logistics efficiency index, factor analysis, object diagram, Federal District

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Эффективность функционирования региональной экономики тесно связана с системой управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны, которая представляет собой взаимосвязь между организационно-функциональной структурой региональной макро-логистической системы и математических моделей, обеспечивающих оптимальное формирование транспортной и складской инфраструктуры.

Вопросу важности и развития транспортной инфраструктуры, в рамках системы управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны, в Российской Федерации уделяется значительное внимание. Например, в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации [1] транспортная инфраструктура рассматривается как один из ключевых драйверов перехода экономики РФ на инновационный путь развития, способствующая развитию транзитного потенциала страны и интеграции ее в единое транспортное пространство Европы. Необходимость повышения уровня транспортной обеспеченности регионов отмечена в Стратегии развития торговли в РФ [2] и в новом проекте, разработанном Министерством промышленности и торговли [3]. Это обусловлено формированием на территории страны многоформатной инфраструктуры торговли и снижением издержек в сети распределения. Кроме этого, обеспечение доступности транспортных услуг позволит, в том числе, повысит мобильность граждан, что является одной из задач развития экономики страны, отмеченной в Прогнозе долгосрочного социально-экономического развития [4].

Влияние транспортно-логистической инфраструктуры на социально-экономическое развитие регионов показано во многих отечественных [5–7] и зарубежных работах [8–12].

К сдерживающим факторам перехода страны на инновационный путь развития, а также по решению задачи реализации условий для развития многоформатной инфраструктуры торговли следует отнести существенный дисбаланс в уровне транспортно-логистической инфраструктуры регионов, а, следовательно, и в их транспортной обеспеченности.

Для устранения разрывов в развитии логистической инфраструктуры субъектов Российской Федерации выделяются значительные средства, как на уровне регионов страны, так и Правительства РФ в виде различных национальных проектов. При разработке национальных проектов в области совершенствования логистической инфраструктуры регионов целесообразно исходить из оценки уровня ее развития. Решение поставленной задачи будет использоваться при корректировке схем его территориального планирования, разработки государственных программ субъекта РФ, а также при построении сетей распределения бизнес-сообществом. Однако значительное количество методик, позволяющих оценить индекс эффективности логистики стран и их субъектов, основано на субъективных данных, полученных в результате опроса высшего менеджмента компаний и специалистов в области логистики.

Методы оценки уровня логистической инфраструктуры. Наиболее известной методикой оценки уровня развития логистической инфраструктуры следует признать расчет LPI

Всемирного банка, основанный на расчете интегрального показателя, включающего шесть комплексных составляющих. Количественное значение индекса эффективности логистики позволяет оценить уровень развития логистической системы страны, в том числе и транспортной инфраструктуры, сравнить с ее другими странами и проследить динамику изменения эффективности логистики в мире. Для расчета индекса LPI используются данные опроса руководителей крупных международных компаний в области оказания логистических услуг и специалистов в области логистики.

Для оценки качества транспортной инфраструктуры можно воспользоваться методикой [13], разработанной Министерством транспорта РФ в рамках программы «Развитие транспортной системы». Данная методика представляет собой алгоритм расчета различных индикаторов, характеризующих уровень развития транспортно-логистической инфраструктуры как Российской Федерации, так и ее субъектов. В рамках данного подхода индекс качества транспортной инфраструктуры рассматривается как показатель, свидетельствующий об изменении состояния транспортно-логистической инфраструктуры исследуемого объекта по отношению к предыдущему периоду времени. Он рассчитывается по формуле:

$$I_t = K_1 V_1 + K_2 V_2 + K_3 V_3 + K_4 V_4 + K_5 V_5, \quad (1)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – индексы качества инфраструктуры железнодорожного, автомобильного, морского, внутреннего водного и воздушного транспорта соответственно;

V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 – объем транспортной работы железнодорожного, автомобильного, морского, внутреннего водного и воздушного транспорта соответственно.

Количественное значение индексов предполагается определять на основе экспертного опроса специалистов в области транспорта по вопросам, связанным с уровнем развития объектов транспортно-логистической инфраструктуры. В качестве объема транспортной работы – грузооборот соответствующего транспорта.

Следует отметить и индекс качества портовой инфраструктуры, входящий в более общий индекс конкурентоспособности путешествий и туризма (ГТСИ), а также глобального индекса конкурентоспособности, ежегодно публикуемого Всемирным экономическим форумом. Данный интегральный показатель позволяет оценить уровень развития портовой инфраструктуры страны. Для его расчета проводится опрос руководителей объектов портовой инфраструктуры по вопросу качества функционирования портовых сооружений и внутренних водных путей в стране по семибальной шкале. Количественное выражение индекса рассчитывается как средневзвешенное полученных данных.

Таким образом, рассмотренные выше методики основаны на данных опросов, что не исключает вопрос о субъективности полученных данных.

Метод оценки региональной логистической инфраструктуры с учетом географических факторов на основе статистических данных рассмотрен в работах А.Н. Рахмангулова [8]. Авторы все показатели, характеризующие транспортную составляющую логистической инфраструктуры, объединили в две группы инфраструктурные, связанные с состоянием транспортных коммуникаций, и транспортной работы (объемы транспортной работы всех видов транспорта). В отдельную группу (географические факторы) были отнесены данные о количестве международных транспортных коридоров, проходящих через соответствующий регион, и принадлежность к климатической зоне.

Для оценки уровня развития региональной логистической инфраструктуры требовался расчет интегрального показателя:

$$S_j = \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2}{3}}, \quad (2)$$

где K_1^2, K_2^2, K_3^2 – консолидированные коэффициенты по группам инфраструктурные и географические факторы, транспортной работы, соответственно.

Метод оценки логистической инфраструктуры провинций и районов Италии на основе расчета интегрального показателя ACIT предложен F. Carlucci, A. Cira, E. Forte и L. Siviero [11, 12]. Авторы для оценки логистической инфраструктуры провинций предложили использовать индексы железнодорожного, автомобильного, автомобильного и водного транспорта, а также показатели, связанные со стоимостью логистических объектов, количеством транспорта и специалистов по логистике. Для оценки районов – показатели грузооборота автомобильного, водного и железнодорожного транспорта, количество портов, пропускная способность контейнеров, объем инвестиций в человеческий капитал. Индексы представляют собой значение, полученное как средневзвешенное объемов транспортной работы.

Интегральный показатель АСИТ для провинций и районов рассчитывался как сумма произведений показателей логистической инфраструктуры на их значимость. Значимость следовало определять экспертным путем или с помощью метода весовых характеристик.

Необходимо отметить, что в работе А.Н. Рахмангулова логистическая инфраструктура рассматривается только с позиции транспорта и не учитывает деятельность других ее составляющих. Кроме этого, вызывает сомнения необходимость учета климатической зоны. В методике F. Carlucci и др. также ключевыми элементами интегрального показателя являются индексы, связанные с работой транспорта. Обеспечивающая составляющая логистической инфраструктуры представлена только прямыми иностранными инвестициями в человеческий капитал.

Методика оценки логистической инфраструктуры. В данной работе для сравнения уровней логистической инфраструктуры субъектов Российской Федерации Сибирского и Дальневосточного федеральных округов предлагается подход, включающий несколько шагов.

1. Выбор показателей. К показателям логистической инфраструктуры были отнесены данные перевозки грузов автомобильным, тыс. т (K1), железнодорожным, тыс. т (K2) и воздушным, т (K3) транспортом, число предприятий транспорта и хранения, шт. (K4), количество организаций, оказывающих финансовые услуги, шт., (K5), использовавших ИКТ, % от общего количества компаний (K6), а также объем иностранных инвестиций, млн долл. (K7) за 2019 год для каждого региона. Показатель объема перевозки грузов водным транспортом исключен из рассмотрения, так как по трети субъектам РФ Сибирского и Дальневосточного федеральных округов нет официальных статистических данных. С целью исключения избыточных переменных на первоначальном этапе осуществлялась проверка на распределение значений в выборке нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова – Смирнова. Показатели, для которых данное условие не выполнялось, исключались из дальнейшего рассмотрения. На втором этапе проводилась проверка на мультиколлинеарность с использованием коэффициента линейной корреляции Пирсона. Показатели, имеющие наибольшее количество значений свыше 0,7, также исключались из дальнейшего расчета. Исходя из того, что данные представлены в разных шкалах измерения, то проводилась их нормализация с помощью метода z-оценок. На последнем этапе для оценки внутренней согласованности выбранных характеристик, описывающих субъекты Российской Федерации рассчитывался коэффициент α -Кронбаха. Внутренняя согласованность будет считаться допустимой, если его значение превысит 0,7.

2. Сравнение развития логистической инфраструктуры регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Для этого в работе использовался факторный анализ, позволяющий выявить взаимосвязь между независимыми переменными и атрибутами. Метод – анализ главных компонент. Способ вращения – варимакс с нормализацией Кайзера. Все расчеты проводились в программе IBM SPSS Statistics 20.

Результаты и их обсуждения. Основные статистические данные показателей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические данные показателей по Сибирскому и Дальневосточному федеральному округу

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Статистика критерия	Значимость
K1	0,5	78,1	18,38	18,28	0,752	0,624
K2	1,3	55,9	19,46	15,05	0,828	0,499
K3	44	26558,9	7303,18	7897,11	1,047	0,223
K4	84	7203	2031,71	2105,5	0,866	0,442
K5	22	1629	444,95	86,89	0,768	0,597
K6	85,3	97,4	93,25	3,35	0,846	0,472
K7	0,1	5751	733,43	1429,96	1,395	0,041

Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют о значительном разбросе данных, характеризующих деятельность основной составляющей логистической инфраструктуры по субъектам Российской Федерации. К сопоставимым значениям по регионам можно отнести только долю предприятий от общего количества компаний, использовавших информационно-коммуникационные технологии в своей деятельности. Это свидетельствует о существенном дисбалансе в уровне развития основной составляющей логистической инфраструктуры в регионах Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Статистика критерия Колмогорова – Смирнова, а также его значимость для практически всех показателей превышает 5 %. Это свидетельствует о соответствии распределений значений в выборке нормальному закону распределения. Вследствие того, что распределение значений в выборке «Объем иностранных инвестиций»

для выбранных субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов не соответствует нормальному распределению (значимость критерия менее 5 %), то данный параметр исключен из дальнейшего рассмотрения.

Расчетное значение α -Кронбаха составляет 0,338, что свидетельствует о низкой корреляционной связи между показателями, а, следовательно, об отсутствии избыточных переменных в исследовании.

Для определения структуры взаимосвязей между показателями логистической инфраструктуры в работе был проведен факторный анализ. Обзор результатов метода анализа главных компонент показал, что две переменные имеют общий процент объясненной дисперсии 77,32 %, что позволяет предположить наличие двух факторов для представления выбранных параметров для исследования. Факторные нагрузки после вращения по методу варимакс с нормализацией Кайзера представлены в таблице 2.

Анализ данных факторной структуры шести показателей после вращения (табл. 2) подтвердил наличие двух факторов, позволяющих описать представленные показатели логистической инфраструктуры. Первый фактор (наземная инфраструктура) положительно связан с деятельностью автомобильного и железнодорожного транспорта в области грузовых перевозок. Второй – положительно связан с грузоперевозками воздушного транспорта, а также с количеством организаций и предприятий ведущих свою деятельность в сфере транспорта, хранения и финансов. Кроме этого, необходимо учитывать положительное влияние на первый фактор показателя «Количество предприятий транспорта и хранения» и отрицательное – количество компаний, использовавших ИКТ, так как значение факторной нагрузки для них превышает 0,3.

Таблица 2 – Факторные нагрузки показателей логистической инфраструктуры после вращения

Показатель	Фактор	
	1	2
K1	0,935	0,088
K2	0,865	0,03
K3	-0,215	0,951
K4	0,486	0,846
K5	0,611	0,725
K6	-0,435	-0,111

Объясняющие факторы, полученные в результате факторного анализа после вращения, могут быть представлены в виде объектной диаграммы с целью установления связи между ними. Первый фактор выражает переменные, которые наиболее тесно связаны с наземным транспортом, осуществляющим грузовые перевозки в большей мере в пределах страны. Второй фактор, связанный с количеством логистических компаний, позволяет генерировать и привлекать международный трафик грузов, в том числе, и в сфере транзитных перевозок.

Объектная диаграмма субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов представлена на рисунке.

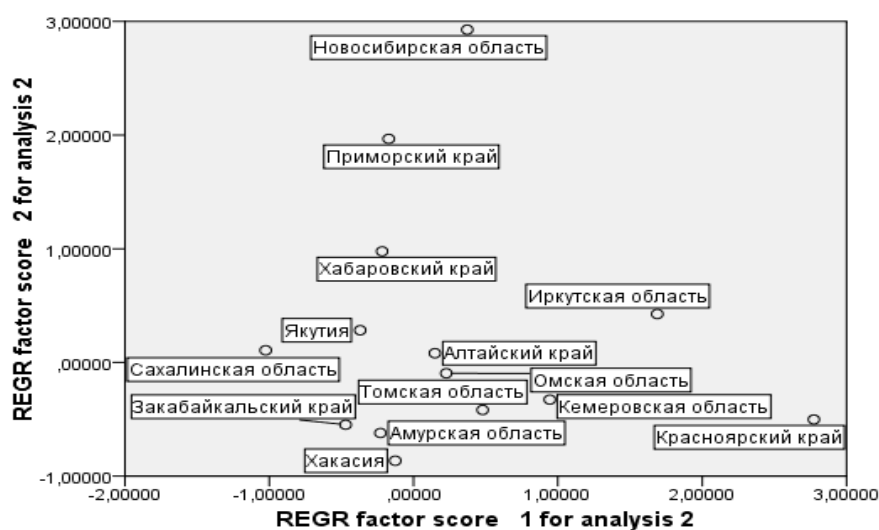


Рисунок – Объектная диаграмма субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов

Анализ субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов Российской Федерации показал значительный дисбаланс в уровне развития региональной логистической инфраструктуры. Полученные результаты позволяют объединить субъекты РФ в несколько групп. К первой группе следует отнести регионы, для которых характерно сбалансированное взаимодействие между функционированием наземной инфраструктуры и количеством организаций, работающих в сфере транспорта, хранения, финансов, а также грузоперевозками воздушным транспортом. К ним можно отнести Алтайский и Забайкальский край, Омскую и Иркутскую области, а также Республику Саха (Якутия). Наиболее высокая степень выраженности факторов соответствует Иркутской области, что хорошо согласуется и с социально-экономическими показателями региона и деятельностью компаний в сфере логистики. Наименьшая степень выраженности факторов соответствует Забайкальскому краю, что свидетельствует о более низком уровне зрелости логистической инфраструктуры по сравнению с другими субъектами Российской Федерации, входящими в данную группу.

Ко второй группе следует отнести регионы Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, для которых наиболее выражен первый фактор (наземная инфраструктура). К ней относятся Томская, Кемеровская, Сахалинская области и Красноярский край. Для данных субъектов характерно большая выраженность наземного транспорта по сравнению с влиянием второго фактора. Это свидетельствует о доминировании в данных регионах автомобильного и железнодорожного транспорта. Наибольшая выраженность наземного транспорта характерна для Красноярского края, что обусловлено значительной долей добывающей промышленности в валовом региональном продукте. Наиболее низкая степень выраженности соответствует Сахалинской области, что, возможно, обусловлено более значимой для региона портовой инфраструктурой. С целью сбалансированного развития логистической инфраструктуры для данных регионов необходимо разрабатывать национальные программы по развитию воздушной отрасли и создавать благоприятные условия по созданию новых логистических компаний в сфере транспорта и хранения товаров.

Третья группа включает в себя субъекты РФ с более высокой степенью выраженности второго фактора. К ней следует отнести Новосибирскую и Амурскую области, Приморский и Хабаровский край, Республику Хакасия. Наиболее низкий уровень развития логистической инфраструктуры отмечен в Республике Хакасия. Это хорошо согласуется и с количественными значениями социально-экономических показателей региона по сравнению с другими субъектами Сибирского и Дальневосточного федерального округов. Наиболее сильно второй фактор выражен для Новосибирской области. Это связано с тем, что область является крупнейшим транспортно-логистическим узлом Западной Сибири со значительной концентрацией логистических предприятий в сфере транспорта, хранения, а также компаний финансовой сферы.

Заключение. В результате проведенного исследования автором показано различие в уровне развития логистической инфраструктуры субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Все показатели могут быть представлены в виде двух объясняющих факторов. Первый фактор (наземная инфраструктура) положительно взаимосвязан с перевозкой грузов автомобильным и железнодорожным транспортом. Второй – перевозкой грузов воздушного транспорта, а также с количеством организаций и предприятий ведущих свою деятельность в сфере транспорта, хранения и финансов.

Построенная на основе факторного анализа объектная диаграмма позволила разделить субъекты Российской Федерации на три группы по степени выраженности факторов. В первую группу отнесены регионы со сбалансированным взаимодействием между наземной инфраструктурой и количеством организаций транспорта и хранения. Во вторую и третью – с доминированием первого и второго фактора. Результаты объектной диаграммы могут быть использованы при разработке стратегии развития субъекта Российской Федерации, а также позволяют выявить недостатки в транспортной обеспеченности региона.

Библиографический список

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (ред. от 28.09.2018). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.05.2021).
2. Стратегия развития торговли в Российской Федерации на 2015–2016 годы и период до 2020 года. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/70836814/#friends>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.05.2021).
3. Проект Стратегии развития торговли в Российской Федерации до 2025 года. – Режим доступа: https://www.minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!opublikovan_proekt_strategii_razvitiya_torgovli_do_2025_goda, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.05.2021).

4. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. – Режим доступа: http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.05.2021).
5. Попов П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на экономические показатели Российской Федерации / П. В. Попов // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2019. – № 12. – С. 19–34.
6. Белозеров В. Л. Оценка влияния состояния транспортно-логистической инфраструктуры региона на экономическое развитие Ленинградской области / В. Л. Белозеров, Е. А. Королева, М. А. Шагалова // *Transport business in Russia*. – 2018. – № 6. – С. 98–102.
7. Катаева Ю. В. Интегральная оценка уровня развития транспортной инфраструктуры региона / Ю. В. Катаева // *Вестник Пермского университета. Сер. Экономика*. – 2013. – № 4 (10). – С. 66–73.
8. Рахмангулов А. Н. Оценка социально-экономического потенциала региона для размещения объектов логистической инфраструктуры / А. Н. Рхмангулов, О. А. Копылова // *Экономика региона*. – 2014. – № 2. – С. 254–263.
9. Wekesa C. T. Effects of Infrastructure Development on Foreign Direct Investment in Kenya / C. T. Wekesa, N. H. Wawire, G. Kosimbei // *Journal of Infrastructure Development*. – 2017. – № 8 (2). – P. 1–18. – DOI 10.1177/0974930616667875.
10. Rehman A. The Impact of Infrastructure on Foreign Direct Investment: The Case of Pakistan', *International* / A. Rehman, I. Muhammad, A. M. Hassan, A. Muhammad // *Journal of Business and Management*. – 2011. – № 6 (5). P. 268–76.
11. Carlucci F. Infrastructure and logistics divide: regional comparisons between North Eastern & Southern Italy / F. Carlucci et al // *Technological and Economic Development of Economy*. – 2017. – № 23 (2). – P. 243–269.
12. Ardalan A. An Efficient Heuristic for Service Facility Location / A. Ardalan // *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference*. – 1984. – P. 181–182.
13. Об утверждении Методики расчета показателей (индикаторов) государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы», транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года и федеральных проектов, входящих в его состав (ред. от 30.04.2019). – Режим доступа: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.05.2021).
14. Rutten W. G. M. M. The extension of GOMA model for determining the optimal number of depots / W. G. M. M. Rutten, P. J. M. Van Laarhoven, B. Vos // *IIE Transactions*. – 2003. – № 33. – P. 1031–1036.
15. Geoffrion A. M. Distribution System Design / A. M. Geoffrion, J. Morris, S. Webster // *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. – New York : Springer, 1995 – № 572. – P. 181–198.
16. Land A. H. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems / A. H. Land, A. G. Doig // *Econometrica*. – 1960. – № 28 (3). – P. 497–520.
17. Megiddo N. On the complexity of some common geometric location problems / N. Megiddo, K. J. Supowit // *Siam J. Comput.* – February, 1984. – Vol. 13, № 1.

References

1. *Kontsepsiya dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda (red. ot 28.09.2018)* [Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020, (ed. from 28.09.2018)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ (accessed 12.05.2021).
2. *Strategiya razvitiya torgovli v Rossiyskoy Federatsii na 2015–2016 gody i period do 2020 goda* [Trade development strategy in the Russian Federation for 2015–2016 and the period up to 2020]. Available at: <http://base.garant.ru/70836814/#friends> (accessed 12.05.2021).
3. *Proekt Strategii razvitiya torgovli v Rossiyskoy Federatsii do 2025 goda* [Draft Strategy for the Development of Trade in the Russian Federation until 2025]. Available at: https://www.minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!opublikovan_proekt_strategii_razvitiya_torgovli_do_2025_goda (accessed 12.05.2021).
4. *Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06 (accessed 12.05.2021).
5. Popov P. V. Vliyaniye transportno-logisticheskoy infrastruktury federal'nykh okrugov na ekonomicheskiye pokazateli Rossiyskoy Federatsii [Influence of the transport and logistics infrastructure of the federal districts on the economic indicators of the Russian Federation]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2019, no. 12, pp. 19–34.
6. Belozеров V. L., Koroleva E. A., Shagalova M. A. Otsenka vliyaniya sostoyaniya transportno-logisticheskoy infrastruktury regiona na ekonomicheskoye razvitiye Leningradskoy oblasti [Assessment of the impact of the state of the transport and logistics infrastructure of the region on the economic development of the Leningrad region]. *Transport business in Russia*, 2018, no. 6, pp. 98–102.
7. Kataeva Yu. V. Integralnaya otsenka urovnya razvitiya transportnoy infrastruktury regiona [Integral assessment of the level of development of the transport infrastructure of the region]. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Ekonomika* [Bulletin of Perm University. Ser. Economy], 2013, no. 4 (10), p. 66–73.

8. Rahmangulov A. N., Kopylova O. A. Otsenka social'no-ekonomicheskogo potentsiala regiona dlya razmeshcheniya ob'yektov logisticheskoy infrastruktury [Assessment of the socio-economic potential of the region for the placement of logistics infrastructure facilities]. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], 2014, no. 2, pp. 254–263.

9. Wekesa C. T., Wawire N. H., Kosimbei G. Effects of Infrastructure Development on Foreign Direct Investment in Kenya. *Journal of Infrastructure Development*, 2017, no. 8 (2), pp. 1–18. DOI 10.1177/0974930616667875.

10. Rehman A., Muhammad I., Hassan A. M., Muhammad A. The Impact of Infrastructure on Foreign Direct Investment: The Case of Pakistan. *International Journal of Business and Management*, 2011, no. 6 (5), pp. 268–76.

11. F. Carlucci et al. Infrastructure and logistics divide: regional comparisons between North Eastern & Southern Italy. *Technological and Economic Development of Economy*, 2017, no. 23 (2), pp. 243–269.

12. Ardalan A. An Efficient Heuristic for Service Facility Location. *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference*, 1984, pp. 181–182.

13. *Ob utverzhdenii Metodiki rascheta pokazateley (indikatorov) gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye transportnoy sistemy», transportnoy chasti kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda i federalnykh proyektov, vkhodyashchikh v ego sostav (red. ot 30.04.2019)* [On the approval of the Methodology for calculating indicators (indicators) of the state program of the Russian Federation "Development of the transport system", the transport part of the comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period until 2024 and federal projects that are part of it (ed. from 30.04.2019)]. Available at: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf> (accessed 12.05.2021).

14. Rutten W. G. M. M., Van Laarhoven P. J. M., Vos B. The extension of GOMA model for determining the optimal number of depots. *IIE Transactions*, 2003, no. 33, pp. 1031–1036.

15. Geoffrion A. M., Morris J., Webster S. Distribution System Design. *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. New York, Springer, 1995, no. 572, pp. 181–198.

16. Land A. H., Doig A. G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, 1960, no. 28 (3), pp. 497–520.

17. Megiddo N., Supowit K. J. On the complexity of some common geometric location problems. *Siam J. Comput.*, February, 1984, vol. 13, no. 1.

УДК 371.39+004.4

**ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ УЧАСТНИКА
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА К РИСКАМ ЦИФРОВОГО ОБУЧЕНИЯ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ¹**

Статья поступила в редакцию 19.03.2021, в окончательном варианте – 25.04.2021.

Ажмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9058-123X>, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Кузнецова Валентина Юрьевна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
ассистент кафедры информационной безопасности, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

В статье приведены преимущества и риски цифровизации образования. В связи с тем, что задача оценки последствий реализации рисков при организации дистанционного обучения является нетривиальной, авторами была предпринята попытка описать методику оценки актуальности рисков в зависимости от выявленного психологического типа личности обучающегося на основе прецедентного подхода. Данная методика может быть автоматизирована для внедрения в действующие цифровые образовательные среды, а также адаптирована для применения в высших учебных заведениях и учреждениях дополнительного профессионального образования как для учащихся, так и для преподавателей, ведущих образовательную деятельность в дистанционном или смешанном режиме.

Ключевые слова: цифровая образовательная среда, образовательный процесс, цифровизация образования, психологический профиль

**ASSESSMENT OF THE PASSENGER OF A PARTICIPANT
OF THE EDUCATIONAL PROCESS TO THE RISKS OF DIGITAL
LEARNING DEPENDING ON HIS PSYCHOLOGICAL PROFILE**

The article was received by the editorial board on 19.03.2021, in the final version – 25.04.2021.

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,
Doct. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9058-123X>, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Kuznetsova Valentina Yu., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,
assistant of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

The article presents the advantages and risks of digitalization of education. Due to the fact that the task of assessing the consequences of the implementation of risks in the organization of distance learning is nontrivial, the authors made an attempt to describe the methodology for assessing the relevance of risks depending on the identified psychological type of the student's personality on the basis of a precedent approach. This technique can be automated for implementation in existing digital educational environments and adapted for use in higher educational institutions and institutions of additional professional education for both students and teachers who conduct educational activities in a distance or mixed mode.

Keywords: digital educational environment, educational process, digitalization of education, psychological profile

Введение. Процесс цифровизации образования, начавшийся в 70-х годах прошлого века, когда в школах стали появляться первые компьютерные классы, сегодня, фактически, становится стратегией развития системы образования, что определяются вектором формирования цифровой

¹ Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-29-14007 мк «Оценка влияния цифровизации образовательного и социального пространства на человека и разработка системы безопасной коммуникативно-образовательной среды».

экономики. Этот факт подтверждается полномасштабной планомерной работой государства по организации цифрового обучения в вузах и школах в рамках реализации федеральных проектов и программ. А в условиях ограничительных мер, вызванных пандемией коронавируса COVID-19, когда цифровое обучение вынужденно и резко стало реальностью, вопрос его изучения стал крайне актуальным как с научной, так и с практической точки зрения.

Анализ литературных источников. Еще до кризисной ситуации 2020 года практика дистанционного обучения была высоко оценена как студентами, так и профессорско-преподавательским составом американских вузов [12]. Онлайн-курсы активно внедрялись в учебные планы, предоставляя большой портфель дистанционных услуг [13]. При этом были отмечены следующие положительные факторы цифрового образовательного процесса (ЦОП):

1. Повышение доступности образования: благодаря дистанционному обучению становятся доступными курсы известных педагогов со всего мира, в том числе для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья. Обучение возможно в любое время суток, что удобно для работающих или семейных слушателей.

2. Возможность реализации гибкой индивидуальной образовательной траектории: для каждого учащегося может быть разработана индивидуальная программа обучения, учитывающая его текущие возможности и потребность в знаниях [2].

3. Экономическая выгода: затраты на проведение дистанционных занятий по сравнению с очными гораздо ниже за счет отсутствия расходов на транспорт и на организацию обучения (аренду помещений, заработную плату обслуживающего персонала, расходы на методическое обеспечение курсов, раздаточный материал и пр.), особенно если количество обучающихся велико [2].

4. Уменьшение трудоемкости и освобождение преподавателей от рутинной работы: проверки домашних заданий, заполнение отчетности по успеваемости, проведение одних и тех же занятий в нескольких потоках и т.п. Это также позволяет решить проблему нехватки преподавателей.

Однако, несмотря на вышеперечисленные положительные аспекты внедрения цифрового обучения, особого внимания требует изучение рисков возникновения его негативных последствий. Исследования показывают, что введение цифровой образовательной системы само по себе порождает ряд рисков, которые угрожают обеспечению безопасности участников образовательной деятельности. Среди них выделяют [3]:

Когнитивные риски. Под когнитивными рисками авторы исследования [11] понимают вероятность реализации угроз устойчивому гомеостатичному функционированию познавательных процессов, антропологической идентичности и существованию человека, опосредованных личностными и психофизиологическими уязвимостями (чертами характера, психофизиологическими особенностями, когнитивными, поведенческими стилями, потенциально способствующими успешной реализации данных угроз). К таким рискам были отнесены информационное перенасыщение, девальвация возможностей памяти, снижение уровня критического мышления учащихся, формирование техногенной (цифровой) идентичности.

Коммуникативные риски. Такие риски связаны с нарушениями коммуникативных навыков участников образовательного процесса, т.е. навыков общения. В эту категорию попали риски возникновения зависимости от социальных сетей, экзистенциальные риски в цифровой среде, эскапизм подростков в цифровой среде, виртуальные деструктивные сообщества, суицидальные виртуальные сообщества («группы смерти») и т.п.

Социальные риски и аддикции. Этот набор рисков связан, в первую очередь, с взаимодействием участников образовательного процесса в социуме и может проявляться в виде социальной эксклюзии, цифрового тоталитаризма, кибер-троллинга, кибер-буллинга, смомби, интернет-игровых аддикций.

Информационные риски. Создание единой цифровой образовательной системы невозможно рассматривать без анализа информационных рисков, ведь их порождает сам факт осуществления образовательного процесса в цифровой среде. К таким рискам относят риски нарушения конфиденциальности, целостности, доступности, аутентичности и неотказуемости.

Риски здоровью. Больше всего опасений у общественности и особенно родителей вызывают риски, связанные со здоровьем учащихся. Неокрепший организм ребенка наиболее сильно подвержен внешним негативным воздействиям, а вред, который потенциально может нанести длительный контакт с компьютерной техникой, широко обсуждается научным сообществом. Среди рисков, связанных со здоровьем участников образовательного процесса, авторы статей [2] выделяют ухудшение зрения, набор избыточного веса, нарушение сна, возникновение заболеваний дыхательных путей и аллергических реакций, нарушения в различных отделах позвоночника, перегрузка суставов кистей и др.

Цель и задачи исследования. Анализ литературы показал, что все вышеперечисленные риски являются актуальными. Однако вероятность их проявления у участников цифрового образовательного процесса может быть различной. В связи с этим возникла необходимость изучить, с какой интенсивностью могут проявиться те или иные негативные последствия реализации цифрового образования у разных людей.

Авторы ряда работ отмечали, что успехи в освоении знаний, в том числе с помощью цифровых технологий, связаны с особенностями восприятия, репрезентативной системы и другими ключевыми характеристиками психологического типа личности [4, 7].

В связи с этим было сделано предположение, что актуальность последствий реализации тех или иных когнитивных, коммуникативных и социальных рисков также может быть связана с психологическим типом личности участника образовательного процесса. Риски, связанные с физическим состоянием участников ЦОП, не рассматриваются в рамках данной статьи, так как они не связаны с психологическими особенностями характера, а только с физиологическими особенностями организма. Информационные риски также не рассматриваются, так как они зависят от состояния информационной обучающей среды, а не от ее пользователей.

Предлагаемый метод исследования. Для установления взаимосвязи между психологическим типом личности участника образовательного процесса и рисками, которым он наиболее подвержен, и с целью последующей выработки дальнейших рекомендаций по минимизации их последствий, предлагается следующая методика.

Этап 1. Сбор группы испытуемых. В первую очередь, необходимо собрать группу испытуемых. Репрезентативность выборки может быть обеспечена за счет участников разного пола, направленности обучения (гуманитарные, технические, экономические классы), региона и вида населенного пункта (село, город, поселок).

Этап 2. Проведение психологического тестирования. До начала работы в дистанционном формате для каждого участника экспериментальной группы необходимо определить психологический тип его личности. Для этих целей рекомендуется использовать методику «7 радикалов» В.В. Пономаренко, т.к. она позволяет в режиме реального времени, без применения тестов выявить психологические и коммуникативные особенности испытуемого по его поведению, по манере строить общение и даже по внешнему виду собеседника. При этом выделяют следующие радикалы [10]:

1. Истероидный (демонстративный).
2. Эпилептоидный (застывающий и возбудимый).
3. Паранойяльный (целеустремленный).
4. Эмотивный (чувствительный).
5. Шизоидный (творческий).
6. Гипертимный (жизнерадостный, оптимистичный).
7. Тревожный (боязливый).

Комбинация и вес тех или иных радикалов образует психологический профиль испытуемого. Чтобы определить эту комбинацию, возможно организовать индивидуальные или групповые беседы с психологом, в рамках которых последний отмечает признаки, соответствующие тому или иному радикалу, и выделяет преобладающий и второй по частоте проявления радикалы в характере каждого участника опроса. Либо можно воспользоваться автоматизированными программными решениями, которые на настоящий момент уже реализованы и могут быть использованы для решения задачи установления психологического типа личности без привлечения психологов [2, 9].

Этап 3. Проведение тестов для оценки начального и конечного уровня последствий от реализации рисков. Далее необходимо выбрать тесты, которые целесообразно использовать для оценки начального и конечного уровня последствий от реализации рисков у каждого из участников выборки. Важно отметить, что для каждого риска требуется свой уникальный тест или методика определения. Например, для оценки памяти могут быть использованы упражнения на механическое запоминание цифр или изображений. Для выявления уровня критического мышления целесообразно применить, например, тест Уотсона-Глейзера. А для установления суицидального риска у детей подходит тест авторов А.А. Кучера и В.П. Костюкевича.

С помощью выбранных тестов и методик проводится оценка начального уровня последствий от реализации рисков у испытуемых. После этого участники допускаются к работе в дистанционном формате. Прохождение повторного выходного тестирования осуществляется не менее чем через 9 месяцев, так как на формирование привычек и автоматических действий требуется срок до 254 дней [13]. Полученные данные сохраняются в базе данных, которая в дальнейшем служит для формирования таблицы прецедентов.

Этап 4. Формирование таблицы прецедентов. Для того чтобы определять актуальные риски для новых участников образовательного процесса, предлагается использовать метод прецедентов.

Вывод на основе прецедентов – это метод принятия решений, в котором используются знания о предыдущих ситуациях или случаях (прецедентах). При рассмотрении нового случая отыскивается похожий прецедент в качестве аналога, который хранится в таблице прецедентов. Таблица прецедентов в рамках текущей задачи включает в себя обезличенные сведения об учащих с указанием превалирующего и второго по частоте проявления радикала в их характерах ($R_{1i}; R_{2i}$), где i – уникальный номер участника опросов. Для каждого из рисков ставится в соответствие N_i^j , где j – порядковый номер риска.

Так как большинство тестов не дают количественных оценок, а результат формируется исключительно качественно, для формализации оценок предлагается использовать лингвистическую переменную «Уровень последствий» и терм-множество ее значений UR , состоящее из 5 элементов: $UR = \{ \text{Нулевой (0); Низкий (A); Средний (B); Выше среднего (C); Высокий (D)} \}$

В классификаторе функциями принадлежности нечетких чисел, заданных на отрезке $[0,1] \in R$, являются трапеции: $\{ \langle 0 \rangle (-0,25; -0,15; 0,15; 0,25); A(0,15; 0,25; 0,35; 0,45); B(0,35; 0,45; 0,55; 0,65); C(0,55; 0,65; 0,75; 0,85); D(0,75; 0,85; 1; 1) \}$, где в нечетком числе $XX(a_1, a_2, a_3, a_4)$ a_1 и a_4 – абсциссы нижнего основания, a_2 и a_3 – абсциссы верхнего основания трапеции.

Графический вид пятиуровневого классификатора приведен на рисунке.

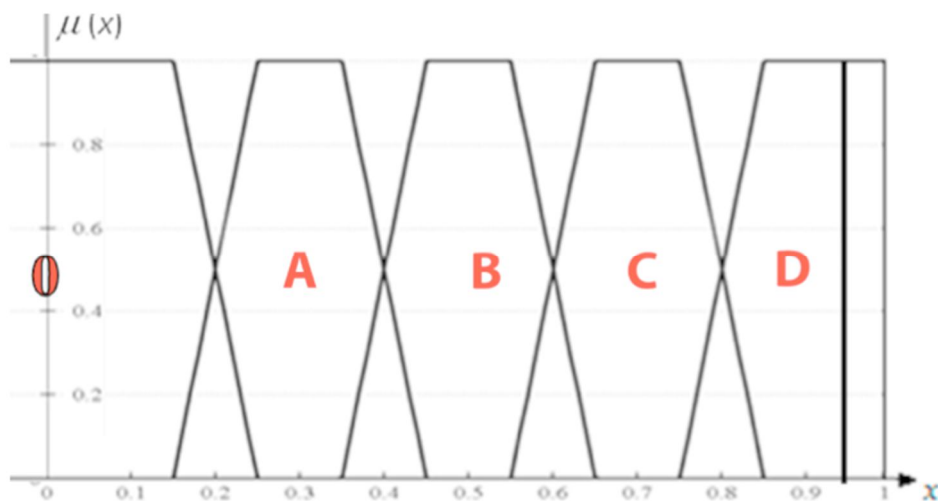


Рисунок – Графический вид пятиуровневого классификатора тестовых оценок

Полученные на Этапе 4 тестовые оценки по каждому из возможных рисков с помощью пятиуровневого нечеткого классификатора переводятся в количественные шкалы. Далее на основании количественных оценок начального и конечного уровней последствий от реализации рисков согласно была рассчитана разница между ними – ΔN_i^j .

Информация может быть сведена в таблицу, фрагмент которой приведен в таблице.

Таблица – Фрагмент макета таблицы результатов участников эксперимента

ID	Наиболее ярко проявляющиеся радикалы		Уровень последствий от реализации риска до эксперимента			Уровень последствий от реализации риска после эксперимента			Δ		
	R_j^1	R_j^2	N_i^1	N_i^2	...	N_i^1	N_i^2	...	ΔN_i^1	ΔN_i^2	...
1	R_1^1	R_1^2	N_1^1	N_1^2	...	N_1^1	N_1^2	...	ΔN_1^1	ΔN_1^2	...
2	R_2^1	R_2^2	N_2^1	N_2^2	...	N_2^1	N_2^2	...	ΔN_2^1	ΔN_2^2	...
...
K	R_K^1	R_K^2	N_K^1	N_K^2	...	N_K^1	N_K^2	...	ΔN_K^1	ΔN_K^2	...

Если $\Delta N_i^j > \delta$ (коэффициент существенности роста уровня риска, определяемый ЛПР), значит для i -го участника эксперимента цифровое обучение привело к росту N_i^j -го риска.

Для того чтобы иметь возможность интерпретировать данную таблицу как набор прецедентов, необходимо исключить дублирующие друг друга строки (обеспечить неизбыточность таблицы прецедентов).

Таким образом, получаются правила вида:

ЕСЛИ $R_{1i} = h1$ и $R_{2i} = h2$, ТО являются актуальными риски, для которых $\Delta N_i^j > \partial$.

В случае, когда левые части правил одинаковые, а правые отличаются, выполняется логическая операция «ИЛИ». Например, если имеются прецеденты:

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$, ТО являются актуальными риски N_i^7, N_i^4 .

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$, ТО являются актуальными риски N_i^3, N_i^6 .

То итоговым правилом после соответствующей обработки будет являться:

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$, ТО являются актуальными риски N_i^7 ИЛИ N_i^4 ИЛИ N_i^3 ИЛИ N_i^6 .

Этап 5. Выбор прецедента. Полученная на этапах 1–4 таблица прецедентов и основанная на ней База знаний в виде продукционных Правил позволяют выстраивать индивидуальные образовательные траектории для снижения возможных негативных последствий для каждого участника ЦОП. Например, когда в класс приходит новый ученик, необходимо выявить психологический тип его личности (установить R_{1i} и R_{2i}) и по таблице прецедентов определить риски, которые для него являются наиболее актуальными, после чего предложить соответствующие рекомендации. К примеру, если был выявлен риск склонности к кибербуллингу, рекомендовать проведение воспитательных бесед, организацию с его участием командных и проектных работ и другие методы профилактики с данным явлением [6].

Применение методики. Описанная выше методика может использоваться в средних и средне-специальных учебных заведениях для оценки уровня последствий от реализации коммуникативных, когнитивных, социальных рисков и аддикций при цифровизации образования, а при адаптации тестирующих методик и в высших учебных заведениях, где применение дистанционного обучения с помощью цифровой образовательной среды также актуально. С изменениями методика может применяться и для анализа последствий от реализации тех или иных рисков для других участников образовательного процесса – учителя, тьюторы, родители. Специалисты, применяющие методику, могут самостоятельно выбрать методики психологического типирования личности и тесты, которые будут использоваться для оценки уровня рисков. Кроме того, данная методика может быть автоматизирована для проведения психологических тестов и выработки рекомендаций по минимизации последствий рисков.

Заключение. Несмотря на положительные аспекты цифровизации среднего образования (доступность и возможность индивидуализации, снижение издержек и пр.), существуют и негативные проявления, объединенные в группы потенциально возможных рисков – коммуникативные, когнитивные, социальные, информационные и риски, связанные со здоровьем участников образовательного процесса. В рамках данной статьи предпринята попытка разработать методику, которая позволяет оценить уровень последствий от их реализации тех или иных видов рисков в зависимости от выявленного психологического типа личности обучающегося на основе прецедентного подхода. Данная методика может быть автоматизирована для внедрения в действующие цифровые образовательные среды, а также адаптирована для применения в высших учебных заведениях и учреждениях дополнительного профессионального образования.

Библиографический список

1. Ажмухамедов И. М. Методика профориентационной работы со студентами направления подготовки «Информационная безопасность» и ее программная реализация / И. М. Ажмухамедов, В. Ю. Кузнецова, О. И. Евдошенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8 (4). – DOI 10.26102/2310-6018/2020.31.4.027.
2. Ажмухамедов И. М. Анализ преимуществ и возможных последствий реализации единой цифровой образовательной среды / И. М. Ажмухамедов, В. Ю. Кузнецова // Перспективы и приоритеты педагогического образования в эпоху трансформаций, выбора и вызовов : сборник научных трудов VI Виртуального Международного форума по педагогическому образованию. – Казань, 2020. – С. 3–12.
3. Баева Л. В. Цифровой поворот в российском образовании: от проблем к возможностям / Л. В. Баева, С. А. Храпов, И. М. Ажмухамедов, А. В. Григорьев, В. Ю. Кузнецова // Ценности и смыслы. – 2020. – № 5 (69). С. 28–44. – DOI 10.24411/2071-6427-2020-10043.
4. Бакленева С. А. Интегрированное предметно-языковое обучение в военном вузе в формате цифровых технологий / С. А. Бакленева // Перспективы и приоритеты педагогического образования в эпоху трансформаций, выбора и вызовов : сборник научных трудов VI Виртуального Международного форума по педагогическому образованию. Ч. II. – Казань : Издательство Казанского университета, 2020.

5. Вербицкий А. А. Цифровое обучение: проблемы, риски и перспективы / А. А. Вербицкий // *Homo Cyberus*. – 2019. – № 1 (6). – Режим доступа: http://journal.homocyberus.ru/Verbitskiy_AA_1_2019, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. Ерина И. А. Буллинг и пути его профилактики в образовательной практике / И. А. Ерина, В. А. Бузни, А. А. Корж // *МНКО*. – 2021. – № 1 (86). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/bulling-i-puti-ego-profilaktiki-v-obrazovatelnoy-praktike>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Кондратьев В. Психологические типы учителей и учащихся / В. Кондратьев // *Психологическая наука и образование*. – 2003. – № 3 (52–57).
8. Кочергин Д. Г. Опыт цифровизации высшего образования в США / Д. Г. Кочергин, Е. Е. Жернов // *Профессиональное образование в России и за рубежом*. – 2019. – № 2(34). – С. 12–23.
9. Кузнецова В. Ю. Применение личностно-ориентированных методов профориентации в вузе и их программная реализация / В. Ю. Кузнецова, А. А. Весницова // *Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации*. – Ставрополь, 2020. – С. 41–46.
10. Пономаренко В. В. Практическая характерология. Методика 7 радикалов / В. В. Пономаренко. – Москва : АСТ, 2019. – 224 с.
11. Храпов С. А. Когнитивные риски цифровизации образовательного пространства и проблемы психолого-педагогического сопровождения обучающихся / С. А. Храпов // *Перспективы и приоритеты педагогического образования в эпоху трансформаций, выбора и вызовов : сборник научных трудов VI Виртуального Международного форума по педагогическому образованию*. Ч. II. – Казань : Издательство Казанского университета, 2020.
12. Traxler J. Learning in a mobile age / J. Traxler // *International Journal of Mobile and Blended Learning*. – 2009. – № 1 (1). – P. 1–12. – DOI 10.4018/jmbl.2009010101.
13. Driver P. Pervasive Games and Mobile Technologies for Embodied Language Learning / P. Driver // *International Journal of Computer Assisted Language Learning and Teaching*. – 2012. – Vol. 2, iss. 4. – P. 23–37. – DOI 10.4018/ijcallt.2012100104.
14. Lally P. How are habits formed: Modelling habit formation in the real world / P. Lally, C. H. M. Van Jaarsveld, H. W. W. Potts, J. Wardle // *European Journal of Social Psychology*. – 2010. – № 40. – P. 998–1009. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/ejsp.674>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Azhmukhamedov I. M., Kuznetsova V. Yu., Evdoshenko O. I. Metodika proforientatsionnoy raboty so studentami napravleniya podgotovki «Informatsionnaya bezopasnost» i eyo programmnaya realizatsiya [Methodology of vocational guidance work with students of the direction of training «Information Security» and its software implementation]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2020, no. 8 (4). DOI 10.26102 / 2310-6018 / 2020.31.4.027.
2. Azhmukhamedov I. M., Kuznetsova V. Yu. Analiz preimushhestv i vozmozhnostey posledstviy realizatsii edinoy tsifrovoy obrazovatelnoy sredy [Analysis of the advantages and possible consequences of the implementation of a single digital educational environment]. *Perspektivy i priority pedagogicheskogo obrazovaniya v epokhu transformatsiy, vybora i vyzovov. Sbornik nauchnykh trudov VI Virtualnogo Mezhdunarodnogo foruma po pedagogicheskomu obrazovaniyu* [Prospects and priorities of pedagogical education in the era of transformations, choices and challenges : collection of scientific papers of the VI Virtual International Forum on teacher education]. Kazan, 2020, pp. 3–12.
3. Baeva L. V., Khrapov S. A., Azhmukhamedov I. M., Grigoriev A. V., Kuznetsova V. Yu. Tsifrovoy povorot v rossiyskom obrazovanii: ot problem k vozmozhnostyam [Digital turn in Russian education: from problems to opportunities]. *Tsenosti i smysly* [Values and meanings], 2020, no. 5 (69), pp. 28–44. DOI 10.24411/2071-6427-2020-10043.
4. Bakleneva S. A. Integrirovannoye predmetno- yazykovoye obucheniye v voyennom vuze v formate tsifrovoykh tekhnologiy [Integrated subject-language education in a military university in the format of digital technologies]. *Perspektivy i priority pedagogicheskogo obrazovaniya v epokhu transformatsiy, vybora i vyzovov : sbornik nauchnykh trudov VI Virtualnogo Mezhdunarodnogo foruma po pedagogicheskomu obrazovaniyu*: [Prospects and priorities of pedagogical education in the era of transformations, choices and challenges : collection of scientific papers of the VI Virtual International Forum on teacher education: collection of scientific papers], Part. II. Kazan, Kazan University Publishing House, 2020.
5. Verbitskiy A. A. Tsifrovoye obucheniye: problemy, riski i perspektivy [Digital education: problems, risks and prospects]. *Homo Cyberus*, 2019, no. 1 (6). Available at: http://journal.homocyberus.ru/Verbitskiy_AA_1_2019.
6. Erina I. A., Buzni V. A., Korzh A. A. Bulling i puti yego profilaktiki v obrazovatelnoy praktike [Bullying and ways of its prevention in educational practice]. *MNKO*, 2021, no. 1 (86). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/bulling-i-puti-ego-profilaktiki-v-obrazovatelnoy-praktike>.
7. Kondratyev V. Psikhologicheskiye tipy uchiteley i uchashchikhsya [Psychological types of teachers and students]. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovaniye* [Psychological Science and Education], 2003, no. 3 (52–57).
8. Kochergin D. G., Zhernov E. E. Opyt tsifrovizatsii vysshego obrazovaniya v SSHA [Experience of digitalization of higher education in the USA]. *Professionalnoe obrazovanie v Rossii i za rubezhom* [Professional education in Russia and abroad], 2019, no. 2 (34), pp. 12–23.
9. Kuznetsova V. Yu., Vesnintseva A. A. Primeneniye lichnostno-oriyentirovannykh metodov proforientatsii v vuze i ikh programmnaya realizatsiya [The use of personality-oriented methods of career guidance in the

university and their software implementation]. *Fundamentalnyye problemy informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh tsifrovogo transformatsii* [Fundamental problems of information security in the context of digital transformation]. Stavropol, 2020, pp. 41–46.

10. Ponomarenko, V. V. *Prakticheskaya kharakterologiya. Metodika 7 radikalov* [Practical characterology. 7 radicals technique]. Moscow, AST Publ., 2019. 224 p.

11. Khrapov S. A. Kognitivnyye riski tsifrovizatsii obrazovatel'nogo prostranstva i problemy psihologo-pedagogicheskogo soprovozhdeniya obuchayushchikhsya [Cognitive risks of digitalization of the educational space and problems of psychological and pedagogical support of students]. *Perspektivy i priority pedagogicheskogo obrazovaniya v epokhu transformatsii, vybora i vyzovov : sbornik nauchnykh trudov VI Virtualnogo Mezhdunarodnogo foruma po pedagogicheskomu obrazovaniyu* [Prospects and priorities of pedagogical education in the era of transformations, choices and challenges : collection of scientific papers of the VI Virtual International Forum on teacher education: in the collection]. Part II. Kazan, Kazan University Publishing House, 2020.

12. Traxler J. Learning in a mobile age. *International Journal of Mobile and Blended Learning*, 2009, no. 1 (1), pp. 1–12. DOI 10.4018 / jmbi.2009010101.

13. Driver P. Pervasive Games and Mobile Technologies for Embodied Language Learning. *International Journal of Computer Assisted Language Learning and Teaching*, 2012, vol. 2, iss. 4, pp. 23–37. DOI 10.4018 / ijcallt.2012100104.

14. Lally P., van Jaarsveld C. H. M., Potts H. W. W., Wardle J. How are habits formed: Modelling habit formation in the real world. *European Journal of Social Psychology*, 2010, no. 40, pp. 998–1009. Available at: <https://doi.org/10.1002/ejsp.674>.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.9

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТУСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ¹

Статья поступила в редакцию 18.04.2021, в окончательной версии 25.04.2021.

Вешнева Ирина Владимировна, Саратовский национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского, Российская Федерация, г. Саратов, 410012, ул. Астраханская, 83, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-3908-370X, e-mail: veshnevaiv@gmail.ru
Большаков Александр Афанасьевич, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0001-7966-718X, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

Для разработки комплексных математических моделей цифровых двойников социально-экономических систем предлагается применить математический аппарат так называемых статусных функций. Сформулирована соответствующая постановка задачи построения новых математических моделей для оценки состояния социально-экономических систем. Показано, что процесс интеграции цифровых двойников в классическую систему управления традиционно связан с реализацией функций наблюдения, анализа и управления. Описаны тенденции формирования цифровых двойников для использования в социально-экономических структурах. Предложена обобщенная схема математического моделирования на основе использования эффективных численных методов и комплекса проблемно-ориентированных программ для оценки коммуникаций в интегрированной среде кибер-физических систем на базе статусных функций. Рассмотрен пример реализации этапа предложенной концепции, связанного с построением комплекса проблемно-ориентированных программ.

Ключевые слова: математические модели, цифровые двойники, социально-экономические структуры, статусные функции, кибер-физические системы

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS BASED ON STATUS FUNCTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS OF SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

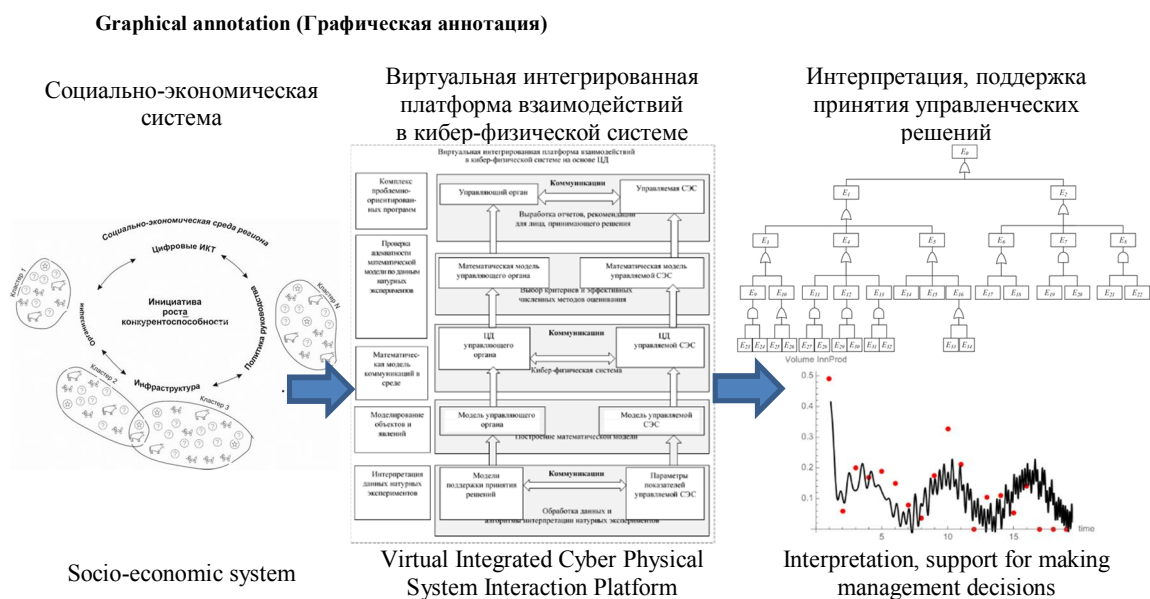
The article was received by the editorial board on 18.04.2021, in the final version – 25.04.2021.

Veshneva Irina V., N.G. Chernyshevsky Saratov National Research University, 83 Astrakhan-skaya St., Saratov, 410012, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0002-3908-370X, e-mail: veshnevaiv@gmail.ru
Bolshakov Alexander A., Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0001-7966-718X, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

To develop complex mathematical models of digital twins of socio-economic systems, it is proposed to apply the mathematical apparatus of the so-called status functions. The corresponding formulation of the problem of constructing new mathematical models for assessing the state of socio-economic complexes has been formulated. It is shown that the process of integrating digital twins into a classical control system is traditionally associated with the implementation of monitoring, analysis and control functions. Trends in the formation of digital twins for use in socio-economic structures are described. A generalized scheme of mathematical modeling based on the use of effective numerical methods and a complex of problem-oriented programs for evaluating communications in an integrated environment of cyber-physical systems based on status functions is proposed. An example of the implementation of the stage of the proposed concept associated with the construction of a complex of problem-oriented programs is considered.

Keywords: mathematical models, digital twins, socio-economic structures, status functions, cyber-physical systems

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ 20-010-00465.



Введение. Развитие Индустрии 4.0 [1] связано с промышленной революцией, характеризующейся следующими особенностями: не используются новые энергетические технологии, осуществляется массовое использование нового сырья, существенное возрастание энергоэффективности производства, возможность предсказывать будущее, значительное ускорение модернизации и появление экспоненциального увеличения производительности труда [2]. В промышленно развитых странах Европы и Северной Америки государства являются источниками факторов осуществляющихся изменений [3]. В России предложен национальный проект увеличения производительности труда [4, 5], в котором представлена цель обеспечения к 2024 году темпов повышения производительности труда в организациях, относящихся к базовым, несырьевым отраслям не менее 5 % в год (к 2024 году планируется увеличение более чем на 20 % производительности труда). Это позволит перейти Российской Федерации на уровень ведущих экономик мира [7]. Современная четвертая промышленная революция обладает чертами, близкими к предыдущим: модернизация производственной технологии зависит от совершенствования управленческой системы. При этом для более сложных технологий требуется повышать относительный объем автоматизированных систем управления [8]. Эксперты называют критическим уровнем использования цифровых технологий более 40 % предприятий, затем ожидается экспоненциальный рост цифровизации промышленности [9]. Такая цифровизация требует массового внедрения кибер-физических систем, способных самонастраиваться и адаптироваться под новые потребности производителей и потребителей.

Структура этих изменений включает следующие отличительные признаки: интернет вещей (Internet of Things, сокращенно – IoT); цифровые двойники (Digital Twin); 3D-печать [10]; облачные вычисления и большие данные [11]; кибербезопасность; цифровые платформы (digital platforms).

Четвертая промышленная революция началась, ее отличительные признаки проявляются достаточно четко и развернуто. При этом можно с уверенностью утверждать, что, как и в предыдущих революциях, тот, кто раньше других сможет создавать, развивать и использовать технологии отличительных признаков получит преимущество по сравнению с другими предприятиями и странами, причем разрыв будет нарастать экспоненциально.

По экспертным оценкам преимущества получают организации, которые активно работают с инновациями и имеют собственные компетенции в аспекте цифровизации [12].

Одним из возможных препятствий является отсутствие инновационных технологий и моделей [13]. Основу принципиально новой технологии построения и использования математических моделей и систем автоматизированного управления могут составить математические модели с использованием математического аппарата статусных функций.

Причем, в этой связи проблемой является необходимость разработки возможных математических моделей цифровых двойников социально-экономических структур, отличающихся от известных моделей специфическими признаками.

Представим модель формирования цифровых двойников социально-экономических структур на основе статусных функций, разработанных и предложенных в работах [14].

Постановка задачи создания новых математических моделей для оценки состояния социально-экономических систем. Процесс интеграции цифровых двойников (ЦД) в классическую систему управления активно развивается в каждой из следующих функций.

1. *Функция наблюдения.* Наблюдается смена технологического уклада. Индустрия 4.0 имеет дело с совершенно новыми явлениями, которые носят цифровой характер. Цифровой двойник (Digital Twin) в нашем случае является программным аналогом социально-экономической системы (СЭС).

2. *Функция контроля. Синтез и совершенствование ЦД.*

Краткая характеристика в предметной области цифровизации СЭС приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация подходов цифровизации СЭС

Способ цифровизации	Характеристика способа цифровизации
Роботизация – Robot Process Automation (RBA)	Осуществление роботизации операционной деятельности, что позволяет уменьшить продолжительность этих операций и повысить до 80 % результативность и/или эффективность на основе уменьшения фонда заработной платы, а также снижения рисков операционной деятельности
Big Data и соответствующие методы анализа и интерпретации	Повышение результативности деятельности фирмы на основе увеличения скорости и объемов обрабатываемой информации. Использование предиктивной аналитики для построения процедур прогнозирования при обработке больших объемов данных. При этом используются статистические методы обработки многомерных данных, анализ исторических данных, процедуры планирования ожидаемых результатов
Справочные и информационно-поисковые и справочные комплексы (системы)	Осуществление функций формирования требуемой информации, получение требуемых компетенций по систематизации и анализу данных
Чат-роботы	Программные средства, которые функционируют в приложениях. При этом могут имитировать речь и текст для организации взаимодействия по поиску требуемых данных
Искусственный интеллект (AI)	Используется для выполнения комплексных задач программами и оптимизации использования человеческих ресурсов
Виртуальная и дополненная реальность	Технологии проецирования или дополнения реальности техническими средствами для снижения стоимости реализуемых процессов
Интернет вещей (IoT)	Сеть компонентов, которые находятся во взаимодействии, например, совокупность датчиков для сбора данных, удаленного обмена информацией для повышения эффективности решений
Распознавание образов OCR/ICR	Технология способна заменить человека в процессе приема, анализа и проверки документов, предназначена для цифровизации документооборота, систем безопасности, обслуживания клиентов
Блокчейн	Технологии позволяют формировать различные тренировочные ситуации, в которых процесс обучения осуществляется в виде игры

Анализ, выполненный в таблице 1, доказывает, что разработка моделей ЦД социально-экономических структур находит применение анализа больших данных и проведения предиктивной аналитики для формирования прогнозов на основе новых математических моделей. При этом коммуникация между социально-экономическими структурами может быть осуществлена с использованием ЦД. Тогда коммуникация в системе управляющий орган – управляемый социально-экономический объект может быть сведена к модели мета-коммуникаций: управляющий орган – ЦД – управляемый социально-экономический объект, управляемый социально-экономический объект – ЦД – управляющий орган. Новая модель анализа данных позволит сформировать виртуальную интегрированную среду для анализа больших данных и предиктивной аналитики. В новом интегрированном комплексе при реализации управленческих воздействий с использованием больших данных на основе ЦД с применением проблемно-ориентированных программных средств соответствующую технологическую и техническую платформу создают кибер-физические системы. Для синтеза этой организационно-технической платформы определяющее значение имеет технология построения ЦД.

3. *Функции анализа, управления.* Эти функции требуется предусмотреть в архитектуре функционирующей интегрированной платформы кибер-физической системы. При реализации этих функций возникают существенные трудности: ограничение ресурсов, возможное отсутствие обратной связи в подсистеме: управляющий орган – управляемая социально-экономическая система.

Кибер-физическая система включает совокупность взаимодействующих компонентов для достижения в процессе управления единой цели [15]. Математические модели подобных сложных

комплексов в целом соответствуют основным положениям синергетики [16] и создаются на основе методов, разработанных в физике, химии, биологии [17].

Трудность использования математических моделей и методов связана с отсутствием шкал измерения, которые используются в естественных науках (измерение в м/с скорости, в кг массы и т.п.). Для ее преодоления целесообразно использовать лингвистические переменные для описания, например, психофизиологических показателей в эргатических системах на базе теории нечетких множеств [18], а также интерпретации данных, получаемых в процессе натуральных экспериментов, с применением так называемых статусных функций (СФ).

Алгоритм на основе СФ позволяет вводить лингвистические оценки и представлять их комплекснозначными функциями, называемых статусными. Математические модели на основе СФ лишены многих недостатков классических моделей социально-экономических процессов, таких как статичность и невозможность учесть перекрестность и взаимовлияние исследуемых компонент процессов.

Основными тенденциями синтеза ЦД социально-экономических систем (СЭС) являются следующие:

1. Увеличение числа состояний, которые оцениваются, а также компонентов структуры данных, которые подлежат анализу.
2. Повышение производительности и сложности информационных платформ, для реализации проблемно-ориентированных программных средств.
3. Усложнение требований к структуре и качеству оцениваемых значений параметров СЭС, многокомпонентности вложенных структур оценок, перекрестности и сложности процессов, которые реализуются в социально-экономических системах.
4. Активизация субъектов и процессов взаимодействия при организации управления для увеличения степени его автоматизации.

При этом возникает проблема создания математических моделей, позволяющих увеличивать количество контролируемых переменных и параметров для автоматизации используемого процесса поддержки принятия решения (ППР). Это инициирует использование современных технологий, техники и соответствующих математических методов [19–20]. Так при разработке новых способов управления образовательным процессом активно применяются различные модели, нечеткие, булевы и т.д.

Таким образом, разработка новых методов для оценивания состояния социально-экономических систем с учетом сложности, субъективности и многомерности является весьма актуальной проблемой. Предложенный математический метод целесообразно применять при построении интеллектуальной мониторинговой системы, а также ППР при анализе показателей функционирования СЭС, таких как, например, отдельные предприятия или структуры показателей деятельности регионов РФ для повышения результативности и эффективности управления по характеристикам СЭС и успешного решения задач, обусловленных целями функционирования системы управления отдельными предприятиями или регионами.

Концепция разработки и интеграции новых математических моделей. Концепция математического моделирования на основе результативных математических методов и построения модели, которая описывает эргатическое взаимодействие в виде соответствующих коммуникаций цифровых двойников на базе интегрированной платформы для различных кибер-физических систем, целесообразно отобразить как последовательность пяти этапов (рис. 1).



Рисунок 1 – Архитектура интегрированной платформы кибер-физических системы с использованием математического моделирования для применения результативных математических методов на основе статусных функций

1 этап. Интерпретация данных, получаемых в результате натуральных экспериментов. На этом этапе требуется анализ данных контролируемых переменных СЭС. Так, например, анализ показателей социально-экономической деятельности регионов РФ и моделей проведен в работах [22, 23].

2 этап. Математическое моделирование социально-экономических процессов и объектов. Лучшим базисом, который целесообразно использовать для синтеза математических моделей цифровых двойников являются СФ. Из их комбинации можно сформировать итоговые математические модели, которые предложены и представлены в статье [14]. Новая математическая модель позволяет построить интегрированную платформу для кибер-физических систем. На этой платформе целесообразно реализовать обучение для синтеза гибридных эргатических систем.

3 этап. Математическая модель коммуникаций в среде. Будем ориентироваться на мета-коммуникации в кибер-физической системе. Причем непосредственная коммуникация и взаимодействие управляющий орган – управляемый социально-экономический объект заменяются мета-коммуникацией цифровых двойников: управляющий орган – ЦД – управляемый социально-экономический объект, управляемый социально-экономический объект – ЦД – управляющий орган.

4 этап. Проверка адекватности предложенных математических моделей с использованием данных натуральных экспериментов. Целесообразно осуществить интерпретацию информации, полученной в результате экспериментов методом СФ, а также на базе уравнений Колмогорова-Чепмена [24, 25] на основе данных, полученных в системе FIRA PRO.

5 этап. Комплекс проблемно-ориентированных программ [26]. Ниже приводится описание архитектуры оценок параметров оценки деятельности СЭС на примере оценки конкурентоспособности регионов РФ.

Пример реализации концепции. Опишем 5-й этап построения комплекса проблемно-ориентированных программ. Во-первых, на основе сбора данных формируется лингвистическое описание результатов оценивания. Для оценки состояния переменных «Степень износа основных фондов», «Численность населения с доходами ниже прожиточного минимума», «Количество официальных безработных», «Ветхое и аварийное жилье», «Задолженность по налогам и сборам» используется таблица 2 с соответствующим лингвистическим описанием.

Таблица 2 – Лингвистическое описание переменных для данных из системы FIRA PRO

Интерпретация значений параметров на основе данных FIRA PRO			
Оценка тренда	Высокие значения показателя, растет последние 3 года, более чем на 10 % превышает аналогичный показатель по соседним регионам	Предельно допустимое пороговое значение, достигнуто в результате снижения показателя	Низкие значения показателя, растет последние 3 года, более чем на 10 % ниже аналогичного показателя по соседним регионам
	Высокие значения, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности	Предельно допустимое пороговое значение, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности	Низкие значения, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности
	Высокие значения показателя, растет последние 3 года	Предельно допустимое пороговое значение, достигнуто в результате повышения показателя	Высокие значения показателя, снижается последние 3 года

В результате формируются соответствующие комплекснозначные статусные функции (СФ). Во-вторых, осуществляется формирование иерархичных взаимосвязанных структур. В результате получен причинно-следственный граф (рис. 2).

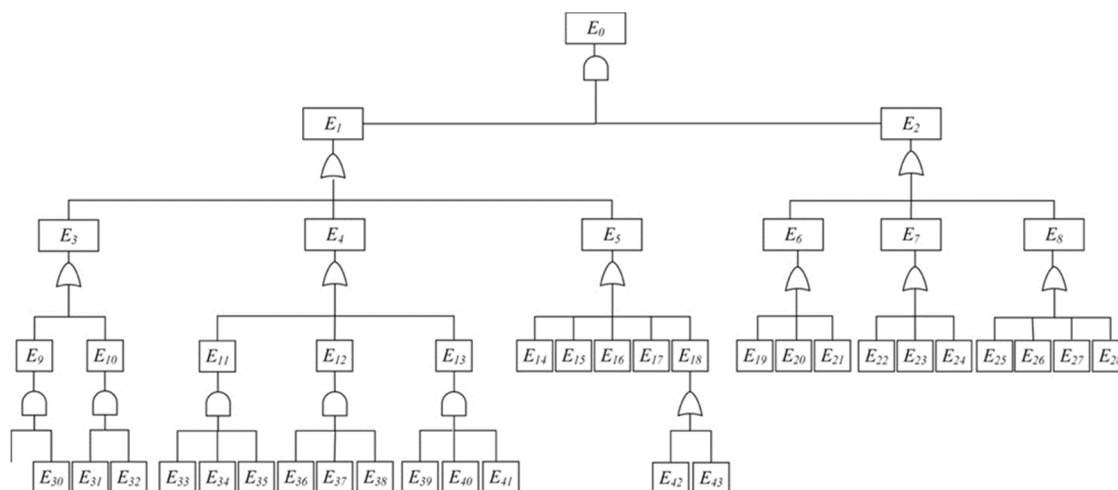


Рисунок 2 – Причинно-следственный граф оценки рисков региональной конкурентоспособности

В представленной на рисунке 2 структуре следующие показатели: стоимость основных фондов (E29); степень износа основных фондов (E30); плотность железнодорожных путей (E31); плотность автомобильных дорог (E32); среднедушевые денежные доходы (E33); численность населения с доходами ниже прожиточного минимума (E34); количество официальных безработных (E35); ожидаемая продолжительность жизни (E36); коэффициент естественного прироста населения (E37); коэффициент миграционного прироста (E38); ветхое и аварийное жилье (E39); численность врачей на 10000 населения (E40); число зарегистрированных преступлений (E41); выбросы загрязняющих продуктов (E42); сброс в водные объекты загрязненных сточных вод (E43) получены в результате сбора и анализа данных [27, 28]. Остальные показатели, объединяющие листовые вершины в причинно-следственный граф введены в результате логических операций, представленных в [14].

В-третьих, для структуры групп более высоких показателей формируется система дифференциальных операторов. В результате аналогом описываемой структуры становится система дифференциальных уравнений на основе СФ. Система получается аналогично уравнениям мировой динамики Форрестера.

Заключение. Таким образом, на основе оценок, представленных методом СФ, можно построить динамические модели ЦД для использования в кибер-физических системах. Структуры, которые можно построить на основе статусных функций, достаточно просто сформировать из моделей оценивания показателей на основе лингвистических термов. Статусные функции являются «мостом» между простыми представлениями человека об окружающем мире и явлениях к строгой неопределенности квантовой механики. Преимуществом модели является учет сложности, высокой степени неопределенности и перекрестности социально-экономических процессов. Модели позволяют строить уровневые структуры возможных состояний. Главным преимуществом является предикативность модели и ее пригодность как для прогнозов, так и для описания мета-взаимодействий интегрированной среде кибер-физических систем.

Библиографический список

1. Клейменова Л. Индустрия 4.0 в 20 цифрах и фактах / Л. Клейменова. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/trends/industry/5daef6429a7947c1bfe43006>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.03.2021).
2. Государство как платформа // Центр стратегических разработок. – Москва, 2018.
3. Государство как платформа: люди и технологии // РАНХиГС. – Москва, 2019.
4. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 20. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.03.2021).
5. Национальный проект «Производительность труда и поддержка занятости». – Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda_i_podderzhka_zanyatosti/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 02.03.2021).
6. Иванов О. Б. Национальный проект по производительности труда: ключ «Экономического рыбка» для России / О. Б. Иванов, Е. М. Бухвальд // ЭТАП. – 2019. – № 2. – С. 28–44.
7. Национальные проекты: ключевые цели и ожидаемые результаты // Правительство России. – Режим доступа: <http://government.ru/projects/selection/741/35675/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.03.2021).
8. Четвертая промышленная революция. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/images/a/aa/6.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
9. Сидоров А. В. Роботизация бизнес-процессов как инструмент повышения производительности труда сотрудников компании / А. В. Сидоров // Хронэкономика. – 2019. – № 4 (17). – С. 64–68.
10. Аддитивные технологии в действии. – Режим доступа: <https://rostec.ru/news/additivnye-tehnologii-v-deystvii/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
11. Максимов К. В. Эффективность использования облачных вычислений: методы и модели оценки / К. В. Максимов // Техническая литература. Прикладная информатика. – 2016.
12. MacKinsey and Company. Эффективная Россия: производительность как фундамент роста. – Режим доступа: <https://www.gtmarket.ru/news/state/2009/04/1986>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
13. Романов Е. В. Стратегические ориентиры развития экономики России / Е. В. Романов, Н. В. Кузнецова, О. С. Пономарева, О. Л. Назарова, Ю. В. Литовская, Т. В. Майорова. – Магнитогорск, 2019.
14. Veshneva I. V. The status functions method for processing and interpretation of the measurement data of interactions in the educational environment / I. V. Veshneva, T. B. Chistyakova, A. A. Bolshakov // SPIIRAS Proceedings. – 2016. – Vol. 6, iss. 49. – P. 144–166. – DOI 10.15622/sp.49.8. ISSN 20789181.
15. Yakovenko V. Statistical mechanics of money, wealth, and income / V. Yakovenko, J. B. Rosser, Jr. Colloquium // Reviews Modern Physics. – 2009. – Vol. 81. – 1703 p.
16. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности / Г. Хакен. – Москва : ПЕР СЭ, 2001. – 351 с.
17. Social consensus through the influence of committed minorities / J. Xie, S. Sreenivasan, G. Korniss, W. Zhang, C. Lim, B. K. Szymanski // Phys. Rev. E. – 2011. – Режим доступа: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1102/1102.3931v2.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 04.03.2021).
18. Вешнева И. В. Применение математического аппарата теории нечетких множеств к задачам управления вузом на основе сбалансированной системы показателей / И. В. Вешнева, А. А. Большаков, Л. А. Мельников, Л. Г. Перова // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – Т. 1.1, № 43. – С. 117–121.
19. Bender C. M. Extension of PT – Symmetric Quantum Mechanics to Quantum Field Theory with Cubic Interaction / C. M. Bender, D. C. Brody, H. F. Jones // Phys. Rev. D. – 2004. – Vol. 70. – 025001 p. ; Erratum // Phys. Rev. D. – 2005. – Vol. 71. – 049901 p.
20. Castellano C. Statistical physics of social dynamics / C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto // Reviews of modern physics. – 2009. – № 81 (2). – P. 591–659. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/0710.3256.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 14.03.2021).
21. Sokolovski D. Are the 'weak measurements' really measurements? / D. Sokolovski // Quanta. – 2013. – Vol. 2. – P. 50–57. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1305.4809.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 02.03.2021).
22. Bolshakov A. Mathematical model of integration of cyber-physical systems for solving problems of increasing the competitiveness of the regions of the Russian Federation / A. Bolshakov, I. Veshneva, D. Lushin // Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021. Decision and Control 333. – 2021. – Vol. 333. – P. 129–139. – Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_11, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. ISSN 2198-4182.
23. Veshneva I. Regional competitiveness research based on digital models using Kolmogorov-Chapman equations / I. Veshneva, G. Chernyshova, A. Bolshakov // Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021. Decision and Control 333. – 2021. – Vol. 333. – P. 141–154. – Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_12, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. ISSN 2198-4182.

24. Осипков А. А. Разработка информационной системы для машинного синтеза и решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена / А. А. Осипков, В. А. Кушников // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах : сборник научных статей по материалам XI Международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 6–8.

25. Каменский Е. Г. «Киберфизическое» общество: субъектность. Ценности. Коммуникация / Е. Г. Каменский // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Экономика. Социология. Менеджмент. – 2016. – № 4 (21). – С. 224–233.

26. Вешнева И. В. Проектирование интеллектуальной информационной системы для анализа и прогнозирования динамики рисков конкурентоспособности регионов РФ / И. В. Вешнева, Г. Ю. Чернышова, А. А. Большаков // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2021. – № 56 (82). – С. 81–88.

27. EU Regional Competitiveness Index (RCI). – Режим доступа: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/work/201701_regional_competitiveness2016.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 12.03.2021).

28. Regional Innovation Scoreboard (RIS). Режим доступа: https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/facts-figures/regional_en, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 04.03.2021).

References

1. Kleymenova L. *Industriya 4.0 v 20 tsifrakh i faktakh* [Industry 4.0 in 20 figures and facts]. Available at: <https://www.rbc.ru/trends/industry/5daef6429a7947c1bfe43006> (accessed 01.03.2021)

2. Gosudarstvo kak platforma [State as a platform]. *Tsentr strategicheskikh razrabotok* [Center for Strategic Research]. Moscow, 2018.

3. Gosudarstvo kak platforma: lyudi i tekhnologii [The state as a platform: people and technologies]. *RANHiGS* [RANEPА]. Moscow, 2019.

4. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.2018 g. № 20* [Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 20]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (accessed 01.03.2021).

5. *Natsionalnyy proyekt «Proizvoditelnost truda i podderzhka zanyatosti»* [National project "Labor productivity and employment support"]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda_i_podderzhka_zanyatosti/ (accessed 02.03.2021).

6. Ivanov O. B., Bukhvald E. M. *Natsionalnyy proekt po proizvoditelnosti truda: klyuch «Ekonomiceskogo ryvka» dlya Rossii* [National Project on Labor Productivity: Key to the "Economic Breakthrough" for Russia]. *ETAP* [ETAP], 2019, no. 2, pp. 28–44.

7. *Natsionalnyye proekty: klyuchevyye tseli i ozhidayemye rezultaty* [National Projects: Key Objectives and Expected Results]. Available at: <http://government.ru/projects/selection/741/35675/> (accessed 14.03.2021).

8. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [The fourth industrial revolution]. Available at: <https://www.tadviser.ru/images/a/aa/6.pdf> (accessed 04.03.2021).

9. Sidorov A. V. Robotizatsiya biznes-processov kak instrument povysheniya proizvoditel'nosti truda sotrudnikov kompanii [Robotization of business processes as a tool for increasing the productivity of company employees]. *Hronoekonomika* [Chronoeconomics], 2019, no. 4 (17), pp. 64–68.

10. Additivnyye tekhnologii v deystvii [Additive technologies in action]. Available at: <https://rostec.ru/news/additivnye-tekhnologii-v-deystvii/> (accessed 04.03.2021).

11. Maksimov K. V. *Effektivnost ispolzovaniya oblachnykh vychisleniy: metody i modeli otsenki* [Cloud Computing Efficiency: Methods and Models for Evaluation]. *Tekhnicheskaya literatura. Prikladnaya informatika* [Technical literature. Applied Informatics], 2016.

12. *MacKinsey and Company. Effektivnaya Rossiya: proizvoditelnost kak fundament rosta* [MacKinsey and Company. Effective Russia: Productivity as a Foundation for Growth]. Available at: <https://www.gtmarket.ru/news/state/2009/04/1986> (accessed 04.03.2021).

13. Romanov E. V., Kuznetsova N. V., Ponomareva O. S., Nazarova O. L., Litovskaya Yu. V., Mayorova T. V. *Strategicheskie orientiry razvitiya ekonomiki Rossii* [Strategic guidelines for the development of the Russian economy]. Magnitogorsk, 2019.

14. Veshneva I. V., Chistyakova T. B., Bolshakov A. A. The status functions method for processing and interpretation of the measurement data of interactions in the educational environment. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, vol. 6, iss. 49, pp. 144–166. DOI 10.15622/sp.49.8. ISSN 20789181.

15. Yakovenko V., Rosser J. B., Colloquium Jr. Statistical mechanics of money, wealth, and income. *Reviews Modern Physics*, 2009, vol. 81, 1703 p.

16. Haken G. *Printsipy raboty golovnogo mozga: sinergeticheskiy podkhod k aktivnosti mozga, povedeniyu i kognitivnoy deyatel'nosti* [How the Brain Works: A Synergistic Approach to Brain Activity, Behavior, and Cognitive Performance]. Moscow, PER SE, 2001. 351 p.

17. *Social consensus through the influence of committed minorities*. Available at: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1102/1102.3931v2.pdf (accessed 04.03.2021).

18. Veshneva I. V., Bolshakov A. A., Melnikov L. A., Perova L. G. *Primenenie matematicheskogo apparata teorii nechetkikh mnozhestv k zadacham upravleniya vuzom na osnove sbalansirovannoy sistemy pokazateley* [Application of the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets to the problems of university management based on a balanced scorecard]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2011, vol. 1.1, no. 43, pp. 117–121.

19. Bender C. M., Brody D. C., Jones H. F. Extension of PT – Symmetric Quantum Mechanics to Quantum Field Theory with Cubic Interaction. *Phys. Rev. D.*, 2004, vol. 70, p. 025001. *Erratum Phys. Rev. D.*, 2005, vol. 71, p. 049901.
20. Castellano C., Fortunato S., Loreto V. Statistical physics of social dynamics. *Reviews of modern physics*, 2009, no. 81 (2), pp. 591–659. Available at: <https://arxiv.org/pdf/0710.3256.pdf>. (accessed 14.03.2021).
21. Sokolovski D. Are the 'weak measurements' really measurements? *Quanta*, 2013, vol. 2, pp. 50–57. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1305.4809.pdf> (accessed 02.03.2021).
22. Bolshakov A. A., Veshneva I. V., Lushin D. Mathematical Model of Integration of Cyber-Physical Systems for Solving Problems of Increasing the Competitiveness of the Regions. *Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021, Decision and Control 333*, 2021, vol. 333, pp. 129–139. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_11. ISSN 2198-4182.
23. Veshneva I. V., Chernyshova G., Bolshakov A. A. Regional Competitiveness Research Based on Digital Models Using Kolmogorov-Chapman Equations. *Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG*, 2021, vol. 333, pp. 141–154. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_12/. ISSN 2198-4182.
24. Osipkov A. A., Kushnikov V. A. Razrabotka informacionnoj sistemy dlya mashinnogo sinteza i resheniya sistemy differencial'nyh uravnenij Kolmogorova-Chepmana [Development of an information system for machine synthesis and solution of the Kolmogorov-Chapman system of differential equations]. *Problemy upravleniya v social'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah : sbornik nauchnykh statey po materialam XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Problems of management in socio-economic and technical systems : collection of scientific articles based on the materials of the XI International Scientific and Practical Conference], 2015, pp. 6–8.
25. Kamensky E. G. «Kiberfizicheskoe» obshchestvo: subektnost. Cennosti. Kommunikaciya ["Cyber-physical" society: subjectivity. Values. Communication]. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika. Sociologiya. Menedzhment* [Bulletin of the South-West State University. Ser. Economics. Sociology. Management], 2016, no. 4 (21), pp. 224–233.
26. Veshneva I. V., Chernyshova G., Bolshakov A. A. Proektirovanie intellektualnoy informatsionnoy sistemy dlya analiza i prognozirovaniya dinamiki riskov konkurentosposobnosti regionov RF [Designing an intelligent information system for analyzing and predicting the dynamics of risks to the competitiveness of the regions of the Russian Federation]. *Izvestiya SPbGTI(TU)* [Izvestia SPbGTI(TU)], 2021, no. 56 (82), pp. 81–88.
27. *EU Regional Competitiveness Index (RCI)*. Available at: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/work/201701_regional_competitiveness2016.pdf (accessed 12.03.2021).
28. *Regional Innovation Scoreboard (RIS)*. Available at: https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/facts-figures/regional_en (accessed 04.03.2021).

УДК 004.942

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ОБУЧАЕМЫХ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹**

Статья поступила в редакцию 31.03.2021, в окончательном варианте – 10.04.2021.

Давтян Александр Георгиевич, Московский физико-технический институт, 123098, Российская Федерация, г. Москва, ул. Максимова, 4.

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID 0000-0002-7021-4472, e-mail: agvs@mail.ru

Шабалина Ольга Аркадьевна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28.

кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-8160-306X, e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com

Садовникова Наталья Петровна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28.

доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-7214-9432 e-mail: n_sadovnikova@vstu.ru

Потапов Денис Игоревич, Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

аспирант, ORCID 0000-0002-3833-1505, e-mail: dpotapov.denis@yandex.ru

В работе рассмотрены подходы к моделированию свойства открытости социально-экономических систем, отражающего способность таких систем взаимодействовать с окружением. Предложено включить в описание социально-экономической системы также и ее способность «обучаться», т.е. «подстраивать себя» под непрерывные изменения, происходящие как в самой системе, так и в ее окружении. Введено понятие обучаемости социально-экономической системы и предложена концепция моделирования свойства обучаемости. Разработана модель открытой обучаемой социально-экономической системы, определяемая системой уравнений с псевдоматематическими функциями и операциями, которые отражают немоделируемые в рамках формальной логики способы принятия решения человеком как носителем социальной сущности любой социально-экономической системы. В качестве параметров модели рассматриваются такие характеристики взаимодействия системы с окружением, которые можно наблюдать и формализовать. Показана связь обучаемости системы и управления в системе и описан метод управления в обучаемых социально-экономических системах, в котором процесс управления рассматривается с позиций нарративной практики. В рамках предложенного метода управления математические формализмы применяются для фиксации результатов обучения системы и поддержки процесса управления, основанного на интерпретации этих результатов.

Ключевые слова: социально-экономическая система, открытость социально-экономической системы, обучаемость социально-экономической системы, модель социально-экономической системы, целеполагание, пространство целей, целедостижение, управление в социально-экономических системах, нарратив

MODELING OPEN LEARNABLE SOCIO-ECONOMICAL SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 31.03.2021, in the final version – 10.04.2021.

Davtyan Alexander G., Moscow Institute of Physics and Technology, 4 Maksimov St., Moscow, 123098, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and mathematics), Associate Professor, ORCID 0000-0002-7021-4472, e-mail: agvs@mail.ru

Shabalina Olga A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-8160-306X, e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com

Sadovnikova Natalia P., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0002-7214-9432, e-mail: n_sadovnikova@vstu.ru

Potapov Denis I., National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 sq. Academician Kurchatov, Moscow, 123182, Russian Federation,

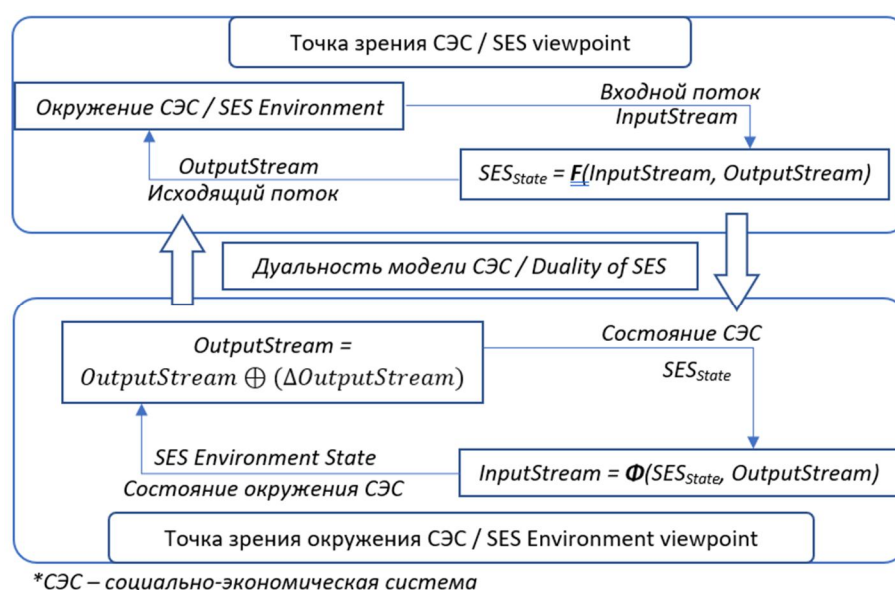
post-graduate student, ORCID 0000-0002-3833-1505, e-mail: dpotapov.denis@yandex.ru

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00250-а.

The article considers approaches to modeling the property of openness of socio-economic systems, representing the ability of such systems to interact with the environment. It is proposed to include in socio-economic system description its ability to "learn", i.e. "adjust" to the continuous changes taking place in the system itself and its environment. The concept of learnability of socio-economic systems is introduced and an approach to modeling learnability is proposed. A model of an open learn-able socio-economic system is described. The model is represented by a system of equations with pseudo-mathematical functions and operations, which reflect nonmodeled within the formal logic decision-making by a person as a carrier of the social essence of any socio-economic system. The relationship between the learnability of the system and the management in the system is shown, and the method of management in open learnable socio-economic systems is described, in which the management process per se is considered in terms of narrative practice. Mathematical methods are used in the proposed method to fix the learning outcomes of the system and support the management process based on the interpretation of the results. The parameters of the models are such characteristics of the interaction of the system with the environment, which can be observed and formalized.

Keywords: socio-economic system, openness of socio-economic system, learnability of socio-economic system, socio-economic system model, goalsetting, goal space, goal achievement, control in socio-economic systems, narrative

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Любая социально-экономическая система (СЭС) возникает и существует, когда необходимость результатов ее деятельности предопределена потребностью общества [1]. Эффективность деятельности любой СЭС напрямую определяется организацией управления СЭС. Поэтому задачи эффективного управления СЭС и формирования стратегий их успешного развития являются актуальными и исследования в этой сфере активно развиваются [2].

Изучение свойств и поведения СЭС является необходимым условием, обеспечивающим эффективное управление системой и успешное исполнение миссии, возложенной на эту систему обществом. Для решения задач, требующих изучения свойств и поведения СЭС, широко применяется моделирование, в частности математическое моделирование.

Ключевым свойством СЭС, обеспечивающим возможность ее функционирования во взаимодействии с окружением, является открытость [3–6]. В рамках теории открытых систем к открытым системам относят системы, которые непрерывно взаимодействуют со своей средой [7]. Соответственно, моделирование открытых СЭС связано с моделированием представления их взаимодействия с окружением и выбором признаков, определяющих это взаимодействие.

Так, в динамической модели открытой СЭС, описанной в [8], основными факторами, определяющими отражающая динамику существования системы и исполнение ее миссии, являются потоки труда и ресурсов, как входные потоки и готовая продукция, оцениваемая спросом как выходной поток. В качестве внешних воздействий рассматриваются инвестиции, определяющие развитие системы. Окружение системы присутствует в виде детерминированных потоков, связанных дифференциальными уравнениями развития системы, которые в конечном итоге и предлагаются в качестве модели взаимодействия СЭС с окружением.

В [9] предлагается абстрагировать СЭС как виртуальное предприятие, функционирование которого определяется общими принципами теории управления. Открытость системы определяется наличием обратных связей. На следующем уровне абстрагирования все входные и выходные потоки рассматриваются как информационные. В качестве входных потоков предлагается рассматривать такую информацию, как капитал, человеческие ресурсы, материалы, и т.д., в качестве выходных потоков – информацию о продукции и (или) услугах. В качестве внешних воздействий рассматриваются также потоки распространения инноваций в рамках категории «диффузий инноваций» Хегерстранда. Тем самым открытость системы определяется как взаимодействие этих потоков, при этом для моделирования неопределенности внешней среды вводится функция неопределенности, с наличием фактора времени.

В [10] признается факт открытости СЭС, участвующих в «обмене ресурсами, информацией и энтропией с другими системами», как находящейся в поле задаваемых внешних сил. При этом для моделирования СЭС используются методы теории конечномерных динамических систем, и аналогии с физическими системами, а сугубо нечисловым параметрам модели приписываются числовые значения в поле действительных чисел.

В [11] СЭС признается открытой, но понятие открытости СЭС не определяется и не обсуждается. В [12] открытость СЭС понимается как «возможность свободного обмена с внешней средой веществом, энергией и информацией», однако модели взаимодействия СЭС с окружением не предлагаются. В [13] также признается необходимость рассмотрения СЭС как открытой системы, однако открытость рассматривается не как свойство системы, а как способ ее представления в рамках общей теории систем.

Таким образом, в существующих исследованиях в сфере моделирования систем СЭС признается необходимость учета открытости как ключевого свойства СЭС, обеспечивающего возможность их функционирования во взаимодействии с окружением, и предлагаются различные способы представления открытости в моделях СЭС.

Однако открытость как имманентное свойство СЭС является лишь формой ее существования. Для обеспечения своего существования в будущем система должна непрерывно «изучать» себя в своем непрерывно меняющемся недетерминированном окружении, т.е. быть способной к обучению. Моделирование СЭС, отражающее способность накапливать знания и применять их для исполнения своей миссии, требует рассмотрения не только свойства открытости, но также и свойства обучаемости СЭС. Целью работы является разработка модели СЭС, отражающее свойства открытости и обучаемости, и способа управления СЭС, обеспечивающего исполнение ее миссии в условиях непрерывного взаимодействия с окружением.

СЭС как открытая обучаемая система. Любая СЭС формируется обществом для удовлетворения его потребностей, и ее функционирование определяется миссией, которую она исполняет в форме отношения общества с самим собой. Любая СЭС существует в непрерывном взаимодействии с непрерывно изменяющимся социально-экономическим пространством. Взаимодействие системы и окружения симметрично, действия системы порождают действия окружения, и наоборот.

Взаимодействие СЭС с пространством осуществляется посредством информационных потоков, которые постоянно накапливаются и непрерывно меняются со временем. Для исполнения миссии, возложенной на СЭС ее окружением, система должна быть открыта к этим потокам, должна их адекватно воспринимать, и быть способной формировать собственные информационные потоки.

Всякая СЭС создается окружением и функционирует для окружения. Ресурсы и результаты находятся вне системы. Система существует, пока она способна к взаимодействию с окружением. Таким образом, открытость – это форма существования системы в окружении в настоящем, т.е. «здесь и сейчас», отражающая имманентное свойство системы взаимодействовать с окружением.

Всякая СЭС возникает для исполнения некоей миссии, возложенной на нее обществом. Для поддержания своей жизнеспособности в условиях взаимодействия с непрерывно изменяющимся социально-экономическим окружением СЭС должна уметь «подстраивать себя» под непрерывные изменения таким образом, чтобы решение проблем, которые перед ней ставит окружение, не приводило к ее гибели, т.е. быть обучаемой. В контексте СЭС обучаемость подразумевает накопление знаний о самой себе и окружении и формирование стратегий своего поведения на основе накопленных знаний для исполнения возложенной на систему миссии. Таким образом, обучаемость, как свойство СЭС, определяет ее успешность ее развития.

Псевдоматематическая модель открытой обучаемой СЭС. Существование любой СЭС определяет ее состояние, т.е. способность исполнять миссию, возложенную на нее окружением. Состояние является результатом ее взаимодействия с окружением, определяемым входными

и выходными потоками. Соответственно, состояние системы можно представить уравнением состояния вида:

$$SES_{State} = F(InputStream, OutputStream), \quad (1)$$

где SES_{State} – состояние системы;

$InputStream$ – входной поток (влияние окружения на систему);

$OutputStream$ – выходной поток (влияние системы на окружение);

F – способ соотнесения входных и выходных информационных потоков, формирующих состояние системы.

В качестве входных потоков выступают ресурсы, которые окружение передает системе для исполнения миссии (объекты материальной и нематериальной природы). Выходные потоки формируются как передача результатов деятельности системы, востребованных окружением (это также могут быть объекты материальной и нематериальной природы).

СЭС сама по себе не является материальным объектом, это артефакт, порождаемый деятельностью людей, которая обеспечивает условия их существования. В контексте категоризации артефактов СЭС – это информационный феномен, так как состояние любой СЭС и движение входных и выходных потоков в СЭС всегда отождествляется с потоками информации. Понятие потока связано со временем, соответственно, каждое состояние системы связано с конкретным моментом времени жизни системы.

Пусть:

t – это параметр линейно-упорядоченного множества, отнесенный к конкретному времени жизни системы;

SES_{State_t} – состояние системы, определяемое совокупностью ресурсов в текущий момент времени t ;

$InputStream_t, OutputStream_t$ – входной и выходной информационные потоки (объемы информации), формирующие состояние системы к моменту времени t .

Тогда открытость системы, как свойство взаимодействовать с окружением в момент времени t , может быть представлена как:

$$SES_{State_t} = F(InputStream_t, OutputStream_t). \quad (2)$$

Изменение входных и выходных потоков в течение времени t приводит к изменению состояния системы. Для моделирования поведения систем, допускающего количественное описание, обычно применяют теорию непрерывных и дискретных динамических систем. Однако для СЭС как систем с объектами нечисловой природы применение этой теории не представляется возможным. Поэтому для моделирования динамики состояния таких систем необходимо добавить к уравнению состояния системы (1) уравнение связей, задающих влияние изменения выходных потоков друг на друга на интервале времени Δt , достаточном для установления этого влияния:

$$SES_{State_{t+\Delta t}} = F(InputStream_{t+\Delta t}, OutputStream_{t+\Delta t}). \quad (3)$$

Обучаемость системы подразумевает влияние состояния системы и изменения выходного потока на изменение входного потока относительно заданного состояния. Процесс обучения СЭС заключается в формировании нового входного потока, приводящего к допустимому состоянию, обеспечивающему существование системы, т.е.:

$$InputStream_{t+\Delta t} = \Phi(SES_{State_t}, OutputStream_{t+\Delta t}), \quad (4)$$

где Φ – способ соотнесения влияния состояния системы и формируемого ей выходного потока на реакцию окружения в форме входного потока.

Именно формируемый входной поток и обеспечивает существование системы, т.е. система в процессе своего функционирования обучается. Влияние выходного потоков на формирование входных потоков системы в классической теории управления называется обратной связью. Однако в контексте моделирования СЭС представление такого влияния в виде функциональной зависимости не представляется возможным в силу неопределенности реакции окружения на систему, т.е. обучаемость СЭС может быть интерпретирована как «умение» снижать степень этой неопределенности.

Способы соотнесения, обозначенные в формулах (2) и (3) как F и Φ соответственно, выбираются человеком, и в силу нечисловой природы мышления, несводимы к функциональным зависимостям. Поэтому, в общем случае, F и Φ символизируют собой «мыслительные» функции, присущие человеку. В большинстве известных моделей СЭС F и Φ представляются в виде функциональных зависимостей, определяющих систему и ее окружение. Но в таких моделях всегда присутствует некая неопределенность в виде параметров моделей системы и окружения, которые нужно каким-либо образом подбирать. Подбор этих параметров, по сути дела, и есть обучаемость, т.е. даже в таких моделях неявно отражено свойство обучаемости СЭС.

Формирование нового выходного потока осуществляется в результате действий, совершенных системой в виде изменения выходного потока, определяемого входным потоком:

$$OutputStream_{t+\Delta t} = (InputStream_t) \oplus (\Delta OutputStream). \quad (5)$$

где « \oplus » – это псевдоматематическая операция, отражающая способ формирования нового выходного потока.

Таким образом, система уравнений вида:

$$\begin{aligned} SES_{State_t} &= F(InputStream_t, OutputStream_t), \\ SES_{State_{t+\Delta t}} &= F(InputStream_{t+\Delta t}, OutputStream_{t+\Delta t}), \\ InputStream_{t+\Delta t} &= \Phi(SES_{State_t}, OutputStream_{t+\Delta t}), \\ OutputStream_{t+\Delta t} &= (InputStream_t) \oplus (\Delta OutputStream) \end{aligned} \quad (6)$$

представляет собой псевдоматематическую модель открытой обучаемой СЭС, отражающую динамику существования системы и исполнение ее миссии. При этом «разрешимость» системы уравнений (6) не гарантирует вечного существования системы. Более того, все СЭС по своей сути конечны, по крайней мере, в рамках той миссии, для исполнения которой система и была сформирована.

Всякая СЭС существует, взаимодействуя с окружением посредством информационных потоков. С другой стороны, окружение, взаимодействуя с СЭС, обеспечивает возможность реализации себя. Таким образом, любая СЭС – это форма взаимодействия окружения с самой собой, и система уравнений [6] отражает дуализм отношения системы и окружения.

Моделирование управления в открытой обучаемой СЭС. Обучаемость СЭС реализуется через управление, т.е. управление позволяет системе «подстраиваться» под непрерывные изменения окружения и сохранять способность исполнять свою миссию. Изменения окружения воспринимаются системой через входные потоки, которые служат основой формирования целей управления в системе.

В условиях непрерывно изменяющихся информационных потоков, определяющих текущее состояние СЭС и динамику ее развития в условиях взаимодействия с окружением, могут изменяться не только изначально полагаемые цели управления, но и сами целевые ориентации системы в своем окружении. В свою очередь это может существенно повлиять на априорные представления о целях управления; принципиальной их достижимости и стратегиях достижения; и, возможно, необходимости самого достижения цели (или целей) как таковой. Управление системой без учета непрерывного обмена данными системы с окружением, формирующего информационные потоки, определяющие целевое состояние самой системы, может привести к потере ее управляемости и, в конечном итоге, к потере смысла ее существования как носителя миссии.

Учет влияния информационных потоков на развитие СЭС обуславливает необходимость доопределять/переопределять цели в процессе развития системы. Для организации управления СЭС в таких условиях в [2] предложена концепция динамического целеполагания, включающая построение исходной модели целей управления системой и ее динамическое обновление (модификацию) в соответствии с действиями, реализуемыми как субъектом, так и объектом управления с учетом текущего состояния системы и ее окружения.

В рамках предложенной концепции модель целей представляется динамичным структурно-упорядоченным пространством, отражающим логику достижимости целей, определяемую динамикой состояния системы в условиях ее взаимодействия с окружением посредством двунаправленных информационных потоков:

$$GoalSpace_t = \langle Objectives_t, Availabilities_t \rangle, \quad (7)$$

где $GoalSpace_t$ – текущее пространство целей управления системой;

$Objectives_t$ – множество текущих целей, определяющих стратегию развития системы;

$Availabilities_t$ – множество отношений текущей доступности целей.

Пространство целей формируется на основе анализа входных потоков, определяющих влияние окружения на систему:

$$GoalSpace = \Psi(InputStream), \quad (8)$$

где Ψ – способ интерпретации пространства целей через входные потоки.

В таком контексте целеполагание рассматривается как непрерывный процесс, формирующий управляемое развитие системы на всех этапах ее жизненного цикла. При этом нарастающая множественность целей определяет успешность реализации миссии социально-экономической системы в обществе, т.е. процесс достижения целей соотносится не со временем их достижения, а со временем существования самой системы. Под целедостижением при этом подразумевается деятельность субъектов и объектов управления, направленных на достижение соответствующих целей управления, в условиях постоянно растущих информационных потоков, обуславливающих динамичное формирование пространства целей [14]. Миссия представляет собой индуктивный

предел динамически развивающегося пространства целей. Носителем миссии является человек, который несет ответственность за разработку стратегии управления, при этом именно за человеком остается «последнее слово» в принятии управленческих решений.

Проблема формирования стратегий достижения целей управления является ключевой проблемой в организации управления в СЭС. В СЭС не существует способов определить, приведет ли к достижению выбранной цели выбранная СУ стратегия или нет. Априорно известных «правильных» стратегий не существует, а есть только вера человека в достижимость цели на основе выбираемой им стратегии, определяемой его предшествующим опытом, мерой ответственности и компетентности. Таким образом, будущее системы присутствует, в понимании человека, в настоящем в виде нарратива, т.е. «инструкции по созданию будущего в настоящем».

В [15] предложен метод управления в СЭС, в котором управление рассматривается с позиций нарративной практики, т.е. как субъективное представление человека как участника процесса управления в настоящем о будущем, определяющее не столько будущее состояние системы, сколько само существование системы в будущем. При этом принятие решений по организации управления и ответственность за эти действия участников процесса управления лежит на самих участниках, т.е. компетенции человека как субъекта управления не моделируются. Нарративность, как способ организации управления, снимает проблему недостижимости целей, но обеспечивает необходимость существования СЭС через ее интегрируемость в процесс развития общества. В таком контексте выбор стратегии управления и есть выбор способа соотнесения влияния состояния системы Φ (см. уравн. 4) и формируемого ей выходного потока на реакцию окружения в форме входного. В результате реализации выбранной стратегии управления человек как субъект управления модифицирует пространство целей и тем самым реализует процесс обучения системы:

$$GoalSpace_{t+\Delta t} = \Omega(SEState_t, OutputStream_{t+\Delta t}), \quad (9)$$

где Ω – мыслительная функция (нарратив).

Для моделирования управления как способа изменения состояния системы на пространстве целей применены методы универсальной алгебры, что позволяет формировать и динамически модифицировать пространство, и исчислять доступность целей и динамику их достижения в условиях взаимодействия с окружением [16, 17]. Предложенная модель реализована в программном комплексе поддержки нарративного управления [18].

Результаты и их обсуждение. При моделировании СЭС в большинстве случаев рассматривается в первую очередь экономическая составляющая, в то время как исполнение миссии связано в первую очередь с организацией деятельности людей, т.е. социальной составляющей системы. Деятельность людей как основной компоненты СЭС подчинена текущим целям управления, упорядочивается этими целями и представляет собой процесс целедостижения. Управление как реализация свойства обучаемости СЭС направлена на достижение компромисса целеполагания и целедостижения, который и является способом исполнения миссии.

Предложенная псевдоматематическая модель СЭС признает за человеком приоритетное право принимать управленческие решения, отражающие результаты обучения системы в процессе ее функционирования, на основе нарративной практики, которые невозможно моделировать в рамках формальной логики. Целью нарративного управления как организации деятельности людей является достижение компромисса целеполагания и целедостижения, обеспечивающего востребованность этой деятельности окружением. Таким образом, и сам человек как основной компонент СЭС обеспечивает свое существование и благополучие в обществе.

Математические методы применяются в предложенной модели для фиксации результатов обучения системы и поддержки процесса управления на основе этих результатов. В качестве параметров моделей рассматриваются такие характеристики взаимодействия СЭС с окружением, определяющие состояние системы, которые можно наблюдать и измерять.

Заключение. Предложенная модель открытой и обучаемой СЭС развивает новое направление в теории управления СЭС, которое не исключает человека, а, напротив, рассматривает его как носителя социальной сущности СЭС и неотъемлемого интеллектуального компонента, привносящего в систему обучаемость, обеспечивающую ее существование и развитие.

В условиях стремительной цифровизации общества в рамках дальнейших исследований предполагается разработка цифровой модели окружения СЭС, необходимой для обучения системы в условиях изменяющихся и изменяемых саму систему входных и выходных информационных потоков, формирующих сетевую структуру современного социально-экономического пространства.

Библиографический список

1. Шабалина О. А. Управление в социально-экономических системах: оптимальность или нарратив? : сборник научных трудов / О. А. Шабалина, А. Г. Давтян, Н. П. Садовников, Д. С. Прыгин // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : сборник научных трудов IV Международной конф. : в 2 ч. – Томск, 2017. – С. 435–438.
2. Давтян А. Г. Динамическое целеполагание в социально-экономических системах / А. Г. Давтян, О. А. Шабалина, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Д. А. Парыгин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 11 (149). – С. 46–56.
3. Pick J. B. A global model of technological utilization based on governmental, business investment, social, and economic factors / J. B. Pick, R. Azari // ICIS – Twenty Ninth International Conference on Information Systems. – 2008.
4. Josef C. B. Introduction: Openness, institutions, and long-run socio-economic development / J. C. Brada, R. Frensch, E. Gundlach // Economic Systems – 2016. – № 40 (2). – P. 195–197.
5. Давтян А. Г. Нарратив и экзистенция как принципы управления в социально-экономической системе / А. Г. Давтян, О. А. Шабалина, Н. П. Садовникова // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 2 (2). – С. 62–66.
6. Черкаска Г. В. Социально-экономические системы: сущность и проблемы исследований / Г. В. Черкаска // Вестник ЛГУ им. А. С. Пушкина. – 2009. – № 3 (Экономика). – 32 с.
7. Bertalanffy L. von. General System Theory – A Critical Review / L. von. Bertalanffy ; пер. с англ. Н. С. Юлиной // General Systems. – 1962 – Vol. VII. – P. 1–20.
8. Бурковский В. Л. Моделирование и алгоритмизация управления неравновесными экономическими системами в условиях конкурентного взаимодействия / В. Л. Бурковский, Е. М. Васильев, Н. В. Минакова // Вестник ВГТУ. – 2014. – № 3–1. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-algoritmizatsiya-upravleniya-neravnovesnymi-ekonomicheskimi-sistemami-v-usloviyah-konkurentnogo-vzaimodeystviya_svoobodnyy. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 06.08.2020).
9. Новиков В. С. Генезис модели взаимодействия региональных социально-экономических систем в трансрегиональном пространстве / В. С. Новиков // Современные технологии управления. – 2008 – № 10 (46). – Режим доступа: <https://sovman.ru/article/4604/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 25.01.2021). ISSN 2226-9339.
10. Лебедев В. И. Синергетические модели социально-экономических систем / В. И. Лебедев, И. В. Лебедева, А. В. Шуваев // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 11–2. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42333>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 06.08.2020).
11. Голоктионова Ю. Г. Актуальные аспекты построения моделей управления открытыми социально-экономическими системами / Ю. Г. Голоктионова // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2020. – № 11. – С. 9–11.
12. Лисичкина Н. В. Проблематика моделирования развития открытых социально-экономических систем / Н. В. Лисичкина // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2020. – № 11. – С. 22–24.
13. Горовой А. А. Предприятие как открытая социально-экономическая система / А. А. Горовой, Т. Н. Селентьева, Е. А. Михель // Российский экономический интернет-журнал. – 2019. – № 2. – 26 с.
14. Шабалина О. А. Моделирование динамического целеполагания в социально-экономических системах / О. А. Шабалина, А. Г. Давтян, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2019. – 76 с.
15. Shabalina O. A. Narrative-based management in socio-economic systems / O. A. Shabalina, A. G. Davtian, N. P. Sadovnikova, D. S. Parygin, D. A. Erkin // International Conference ICT, Society and Human Beings 2017: part of the Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2017 : proceedings / ed. by Piet Kommers; IADIS (International Association for Development of the Information Society). – Lisbon, 2017. – P. 73–79.
16. Shabalina O. A. A lattice-theoretical approach to modeling naturally ordered structures / O. A. Shabalina, D. A. Erkin, A. G. Davtian, N. P. Sadovnikova // Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016). Сер. «ACSR: Advances in Computer Science Research» / editors: O. Berestneva, A. Tikhomirov, A. Trufanov. – 2016. – P. 158–161.
17. Еркин Д. А. Декларативное описание структурных моделей систем / Д. А. Еркин, О. А. Шабалина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (182). – С. 36–40.
18. Шабалина О. А. Система поддержки нарративного управления в социально-экономических системах / О. А. Шабалина, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Е. А. Образцов, В. Н. Рубанюк // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Shabalina_Sadovnikova.pdf_17937e01aa.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 25.01.2021).

References

1. Shabalina O. A., Davtian A. G., Sadovnikova D. S., Parygin D. S. Upravleniye v socialno-ekonomicheskikh sistemakh: optimalnost ili narrativ? : sbornik nauchnykh trudov [Control in socio-economic systems: optimality or narrative? : collection of scientific papers]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsialnoy sfere i medicine* :

sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy konferentsii [Information technology in science, management, social sphere and medicine : collection IV International Conference]. Tomsk, 2017, pp. 435–438.

2. Davtyan A. G., Shabalina O. A., Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Parygin D. A. Dinamicheskoye tselepolaganiye v sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh [Dynamic goal-setting in socio-economic systems]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of computer and information technologies], 2016, no. 11 (149), pp. 46–56.

3. Pick J. B., Azari R. A global model of technological utilization based on governmental, business investment, social, and economic factors. *ICIS – Twenty Ninth International Conference on Information Systems*, 2008.

4. Brada J. C., Frensch R. Gundlach E. Introduction: Openness, institutions, and long-run socio-economic development. *Economic Systems*, 2016, no. 40 (2), pp. 195–197.

5. Davtian A. G., Shabalina O. A., Sadovnikova N. P. Narrativ i ekzistentsiya kak printsipy upravleniya v sotsialno-ekonomicheskoy sisteme [Narrative and existence as control principles in socio-economic systems]. *ITNOU: Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITSEM: Information technology in science, education and management.], 2017, no. 2 (2), pp. 62–66.

6. Cherkasskaya G. V. Sotsialno-ekonomicheskiye sistemy: sushchnost i problemy issledovaniy [Socio-economic systems: subject and problems of investigation]. *Vestnik LGU im. A. S. Pushkina* [LGU Bulletin A.S. Pushkin], 2009, no. 3 (Ekonomika [Economics]). 32 p.

7. Bertalanffy L. von. Perevod s angliyskogo N.S. Yulinoy [Translation from English by N.S. Yulina]. *General System Theory – A Critical Review. General Systems*, 1962, vol. VII, pp. 1–20.

8. Burkovskij V. L., Vasilev E. M., Minakova N. V. Modelirovaniye i algoritimizatsiya upravleniya neravnovesnymi ekonomicheskimi sistemami v usloviyakh konkurentnogo vzaimodeystviya [Modeling and algorithmizing management of economic systems under competition]. *Vestnik VGTU* [Bulletin VGTU], 2014, no. 3–1, Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-algoritmizatsiya-upravleniya-neravnovesnymi-ekonomicheskimi-sistemami-v-usloviyah-konkurentnogo-vzaimodeystviya> (accessed 25.03.2021).

9. Novikov V. S. Genezis modeli vzaimodeystviya regionalnykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem v transregionalnom prostranstve [Genesis of the model of interaction of regional socio-economic systems in the transregional space]. *Sovremennyye tekhnologii upravleniya* [Modern technology of control], 2008, no. 10 (46). Available at: <https://sovman.ru/article/4604/> (accessed 25.03.2021). ISSN 2226-9339.

10. Lebedev V. I., Lebedeva I. V., Shuvaev A. V. Sinergeticheskiye modeli sotsialno-ekonomicheskikh sistem [Synergetic models of socio-economic systems]. *Fundamentalnyye issledovaniya* [Fundamentals researches], 2018, vol. 11–2. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42333> (accessed 25.03.2021).

11. Goloktionova Yu. G. Aktualnyye aspekty postroyeniya modeley upravleniya otkrytymi sotsialno-ekonomicheskimi sistemami [Actual aspects of constructing models of control open socio-economic systems]. *Obrazovaniye i nauka bez granits: fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya* [Education and science without borders: fundamental and applied research], 2020, no. 11, pp. 9–11.

12. Lisichkina N. V. Problematika modelirovaniya razvitiya otkrytykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem [Problem of modeling development of open socio-economic systems]. *Obrazovaniye i nauka bez granits: fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya* [Education and science without borders: fundamental and applied research], 2020, no. 11, pp. 22–24.

13. Gorovoj A. A., Selenteva T. N., Mihel E. A. Predpriyatiye kak otkrytaya sotsialno-ekonomicheskaya sistema [Firm as open socio-economic system]. *Rossiyskiy ekonomicheskij internet-zhurnal* [Russian economic internet magazine], 2019, no. 2. 26 p.

14. Shabalina O. A., Davtyan A. G., Sadovnikova N. P., Parygin D. S. Modelirovaniye dinamicheskogo tselepolaganiya v sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh [Modeling of dynamic goal-setting in socio-economic systems]. Volgograd, Volgograd State Technical University, 2019. 76 p.

15. Shabalina O. A., Davtian A. G., Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Erkin D. A. Narrative-based management in socio-economic systems. *International Conference ICT, Society and Human Beings 2017: part of the Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2017: Proceedings*, ed. by Piet Kommers; IADIS (International Association for Development of the Information Society). Lisbon, 2017, pp. 73–79.

16. Shabalina O. A., Erkin D. A., Davtian A. G., Sadovnikova N. P. A lattice-theoretical approach to modeling naturally ordered structures. *Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016). Ser. "ACSR: Advances in Computer Science Research"*, 2016, pp. 158–161.

17. Erkin D. A., Shabalina O. A. Deklarativnoye opisaniye strukturnykh modeley sistem [Declarative description of structural models of systems]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd State Technical University], 2016, no. 3 (182), pp. 36–40.

18. Shabalina O. A., Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Obracov E. A., Rubanyuk V. N. Sistema podderzhki narrativnogo upravleniya v sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh [Support system of narrative management in socio-economic systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2019, no. 1. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Shabalina_Sadovnikova.pdf_17937e01aa.pdf (accessed 25.03.2021).

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.0480-053
УДК 614.2+616-036.21+004.02

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МЕДИЦИНСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 16.03.2021, в окончательном варианте – 20.04.2021.

Кожневников Андрей Александрович, Новокузнецкий государственный институт усовершенствования врачей – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 654005, Российская Федерация, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, пр. Строителей, 5,
кандидат социологических наук, преподаватель кафедры «Организация здравоохранения и общественное здоровье», ORCID 0000-0003-2156-6364, e-mail: nvkz2004@rambler.ru

В статье представлен подход к моделированию принятия решений в процессе профессионального медицинского образования с учетом теории управления. Рассмотрены возможности применения разработанного автором метода по анализу параметров «проблемного поля» и минимизации факторов «неопределенности» при выборе тем и учебного материала на основе применения индексов наличия проблем. Цель исследования заключалась в рассмотрении вопросов принятия решений в сфере профессионального медицинского образования на основе теории управления, чтобы обеспечить повышение компетенции преподавателей и обучающихся, а также формировать учебные программы и образовательные проекты с учетом отраслевой специфики и существующих ограничений. В качестве метода исследования применено моделирование, включая знаковое моделирование, в том числе с помощью математических методов и соотношений; системный анализ; а также методы ситуационного и логического анализа проблем управления для постановки и выбора альтернатив решения задач исследования. Дополнительно проведена оценка стратегической рефлексии на фоне отраслевой специфики и существующих ограничений при подготовке специалистов в сфере здравоохранения, а также вероятности обеспечения равновесного по Нэшу вектора соответствующих рассматриваемой теме действий. Выводы содержат предложения по внедрению данного подхода при формировании образовательных услуг с целью повышения их управляемости и достижения поставленных целей.

Ключевые слова: моделирование, принятие решений, профессиональное медицинское образование, равновесие по Нэшу, индекс наличия проблемы

MODELING FEATURES IN DECISION-MAKING IN THE FIELD OF PROFESSIONAL MEDICAL EDUCATION

The article was received by the editorial board on 16.03.2021, in the final version – 20.04.2021.

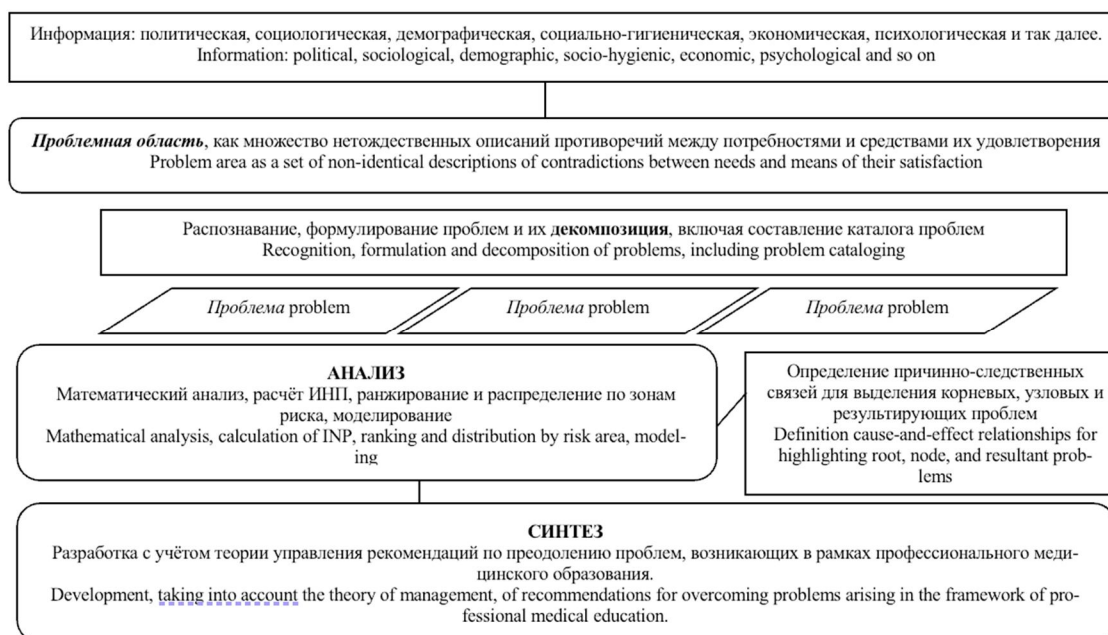
Kozhevnikov Andrei A., Novokuznetsk State Institute of Improvement of Doctors – branch of the FSBOU DPO RMANPO of the Ministry of Health of Russia, 5 Stroiteley Ave., Novokuznetsk, 654005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Sociology), Lecturer at the Department of Health Organization and Public Health, ORCID 0000-0003-2156-6364, e-mail: nvkz2004@rambler.ru

The article presents an approach to modeling decision-making in the process of professional medical education, taking into account the theory of management. Possibilities of application of the method developed by the author on analysis of parameters of "problem field" and minimization of factors of "uncertainty" in selection of themes and educational material based on application of indices of presence of problems are considered. The purpose of the study was to consider decision-making issues in the field of professional medical education based on management theory in order to increase the competence of teachers and students, as well as to form educational programs and educational projects taking into account industry specifics and existing restrictions. As a method of research, modeling was used, including sign modeling, including using mathematical methods and ratios; system analysis; and methods of situational and logical analysis of management problems for setting and selecting alternatives to solve research problems. In addition, strategic reflection was assessed against the background of industry specifics and existing restrictions in the training of specialists in the field of health care, as well as the likelihood of ensuring a Nash-equilibrium vector of actions corresponding to the topic under consideration. The conclusions contain proposals for the introduction of this approach in the formation of educational services in order to increase their manageability and achieve their goals.

Keywords: modeling, decision making, professional medical education, Nash balance, index of problem presence

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Успех образовательной деятельности во многом зависит от тщательного анализа параметров, исследуемого «проблемного поля», что сказывается на качестве решения одной из основных задач механизма управления – *задачи выбора*. Наиболее важно это на этапе принятия решения по подбору учебного материала и формы образовательного процесса, которые необходимо не только выделить в растущем массиве информации, но и, учитывая отраслевую специфику, сформировать так, чтобы с учетом применения управленческих моделей обеспечить сокращение зон «неопределенности», тем самым оптимизируя процесс достижения поставленной цели. Это обусловлено тем, что в последние годы с увеличением спроса на качественные медицинские услуги, в том числе на фоне распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19, растет степень ответственности за подготовку медицинских специалистов. Решая эту задачу, целесообразно так построить понятия, описывающие *проблемную область*, чтобы в сознании познающего субъекта, прежде всего, отразилась практическая деятельность. При этом, постепенно переходя к формированию понятия *проблемы*, через вербальную и невербальную форму необходимо выделить противоречие между определенной социальной потребностью и наличием возможности в ее удовлетворении. При таком подходе «проблема» выступает как исходная форма организации знаний через систему высказываний либо действий. Она генерирует необходимость ее решения, в том числе путем получения новых знаний, совокупность которых, как раз и формирует «*проблемное поле*», где отсутствие или незначительное возмущение, действующих как внутри, так и вне объекта, можно однозначно определить влияние входных и управляющих параметров на выходные [4]. Наряду с этим стремление специалистов медиков к совершенствованию знаний ставит перед учреждением задачу оптимизации учебного процесса с учетом как отечественных традиций, так и принципов, разработанных и апробированных международным сообществом [9].

Цель исследования заключалась в рассмотрении вопросов принятия решений в сфере профессионального медицинского образования на основе теории управления, чтобы обеспечить повышение компетенции преподавателей и обучающихся, а также формировать учебные программы и образовательные проекты с учетом отраслевой специфики и существующих ограничений.

Методы исследования: моделирование, включая знаковое моделирование, в том числе с помощью математических методов и соотношений; системный анализ; а также методы ситуационного и логического анализа проблем управления для постановки и выбора альтернатив решения задач исследования.

Неопределенность. В рамках теории управления общепринято считать, что *неопределенность* относительно параметров, описывающих участников организационной системы, называется *внутренней неопределенностью*, относительно внешних параметров – *внешней неопределенностью*. Член-корреспондент РАН Д.А. Новиков внешнюю объективную неопределенность относил к *неопределенности природы* (или *неопределенности состояния природы*), а внутреннюю

субъективную неопределенность к *игровой неопределенности*. В связи с этим процесс перехода от предпочтений G_{A_0} на множестве A_0 к *индуцированным предпочтениям* G_A на множестве A , основывающийся на законе $W_1(\cdot)$, называют *устранением неопределенности*. Закон $W_1(\cdot)$ определяется функцией $w(\cdot)$, отражающей структуру пассивного *управляемого объекта*, и той информацией I , которой обладает преподаватель либо разработчик проекта (далее агент) на момент принятия решения о выбираемом действии [2]. В теории управления принято считать, что *объективная* (внутренняя и внешняя) *неопределенность* зависит от информации относительно обстановки. В качестве такой информации могут выступать следующие параметры:

1. Множество возможных значений обстановки $\Theta' \subseteq \Theta$, называемое *интервальной неопределенностью*, которая устраняется использованием *максимального гарантированного результата*: $f(y) = \min_{\theta \in \Theta'} w(y, \theta)$, а также применением *гипотезы благожелательности (ГБ)*: $f(y) = \max_{\theta \in \Theta'} w(y, \theta)$ и их комбинаций;

2. Распределение вероятностей $p(\theta)$ на множестве $\Theta' \subseteq \Theta$ является *вероятностной неопределенностью*, которую возможно устранить использованием математического ожидания $f(y) = \int_{\theta \in \Theta'} w(y, \theta) p(\theta) d(\theta)$ и, учетом риска (дисперсии) и моментов более высокого порядков;

3. Функция принадлежности $\mu_{\Theta'}(\theta)$ нечеткого множества $\Theta' \subseteq \Theta$ является *нечеткой неопределенностью*, устраняемой выделением множества максимально недоминируемых действий, так как модель принятия решений при нечеткой исходной информации основывалась на правиле индивидуального рационального выбора: $P^{WT}(\mathfrak{R}_{A_0}, A, I) \subseteq A$. В детерминированном случае выбор агентом действий определяется через максимум его целевой функции: $P^{WT}(\mathfrak{R}_{A_0}, A, I) = \text{Arg max}_{y \in A} f(y)$ [2].

С учетом вышеизложенного, гипотеза детерминизма проявляется в том, что преподаватель, устраняя неопределенность, переходит от предпочтений, зависящих от неопределенных факторов, к предпочтениям, которые зависят от его собственных действий, тем самым, следуя к индуцированным предпочтениям [4]. При этом с позиции системного анализа через изучение неопределенностей, также возможно перейти к решению оптимизационной задачи при условии, что $f(x) \rightarrow \max, x \in G$, где x – элемент некоторого пространства G , определяемого природой модели. $G \subseteq E$, где E – множество, которое имеет сколь угодно сложную природу, определяемую структурой модели и особенностями анализируемой системы [1]. Это важно не только по причине того, что она рассматривается в качестве совокупности процедур принятия решений, но и то, что образовательный процесс носит субъективный характер, основываясь на собственных знаниях, опыте и интуиции тех, которые его определяют и реализуют. В таком контексте следует учитывать общие требования, которые предъявляются к процессу выработки, принятия и выполнения управленческих решений. Так, они должны быть четко определенными в зависимости от целеполагания и эффективными.

Процесс принятия управленческих решений. В схематическом виде процесс принятия решений может быть таким, который предложен Ю.Ф. Мартемьяновым и Т.Я. Лазаревой (рис. 1), которые считают, что первоначально важно разобраться в ситуации, вникнуть в ее суть для того, чтобы, подводя теорию, описать итоговые результаты решения безотносительно к промежуточным исходам и альтернативам [6].

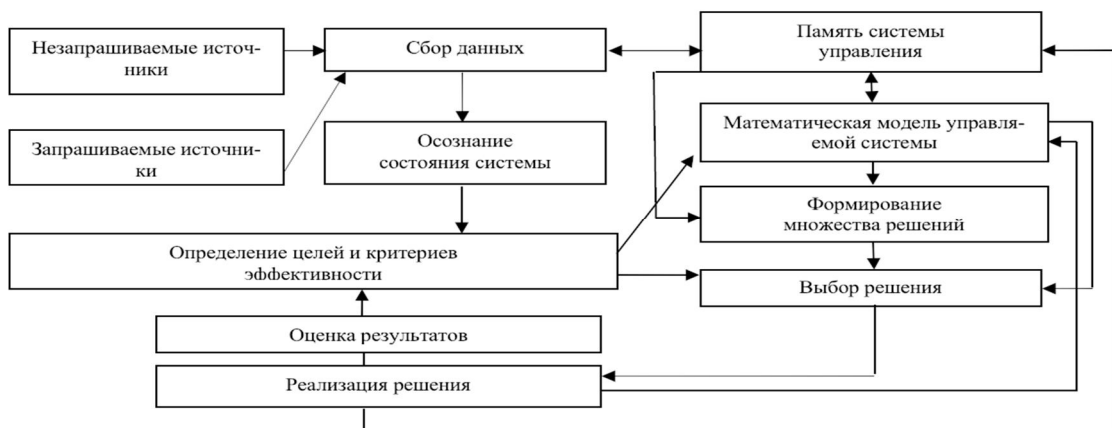


Рисунок 1 – Схема принятия решений

Для выбора решения в отношении содержания и структуры образовательной программы, проекта, цикла и так далее, каждый его разработчик должен смоделировать ход мысли тех, кому это адресовано, что принято считать рефлексией. Следовательно, что при таком подходе важную роль играет информированность не только разработчика, но и обучающихся. Поэтому размышления разработчика о выборе своего решения, а в последующем и действия, приобретает форму стратегической рефлексии, отвечая на вопрос: «Какие решения либо действия выберут остальные?» [8].

Равновесие Нэша в образовательном процессе. С позиции теории игр итогом такой ситуации является равновесие Нэша, когда каждый участник образовательного процесса выбирает наилучшее для себя решение либо действие при фиксированных решениях либо действиях остальных, тогда вектор действий (x_1^*, \dots, x_n^*) называется равновесным по Нэшу, если $\forall i \in N$ $x_i^* \in \text{Arg} \max_{x_i \in X_i} f_i(x_1^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*)$. В результате, чтобы определить свое равновесное по Нэшу действие, разработчик и обучающийся должны знать целевые функции и допустимые множества и быть уверенными, что и остальные участники образовательного процесса их знают и что они знают, что все остальные их знают и т. д. [7]. Наряду с этим принятие решений, как ранее было отмечено, обусловлено необходимостью устранения либо сведению к минимуму неопределенностей всех видов. С этой целью рассмотрим параметры входного воздействия, например, такие как d – показатели демографического состояния населения, z – показатели болезней населения, s – социально-экономические показатели уровня жизни населения, m – показатели социологического опроса и так далее. В обобщенном плане условно обозначим их через параметры x_1, x_2, \dots, x_n . Данные параметры могут меняться, что соответственно отражается на выходных параметрах. В рамках исследования к ним относятся индексы наличия проблем I , которые представим в виде y_1, y_2, \dots, y_n . Через модель $y = f(x)$ устанавливается зависимость выходных параметров y от входных параметров x . Это позволяет перейти к решению основной задачи теории принятия решений – это формирование такой целевой функции Q , которая принимая максимальное (минимальное) значение, учитывала бы ограничения экономического, социального и иного характера, в виде $Q_i(x) \leq 0, i = 1, k$. В результате механизм определения оптимального решения включает модель $y = f(x)$, целевую функцию $Q(y, x)$, а также область допустимых управлений X и технологические ограничения. Для решения вышеуказанной задачи требуется:

1. Определить b^k и b_i^k – коэффициенты экспертных оценок степени влияния факторов на общественное здоровье с помощью расчета коэффициентов согласованности и непротиворечивости, а также провести формализацию самой процедуры экспертной оценки.

2. Найти индекс наличия проблемы I для отдельных факторов (I_ϕ), для группы факторов (I_{gp}) и индекс наличия проблемы общий ($I_{обш}$), при выполнении следующих ограничительных условий: интервал $[0 < I < 1]$ и период $t \in [0, T]$.

3. Провести ранжирование и зонирование индексов наличия проблемы.

4. Подготовить и реализовать рекомендацию для принятия управленческого решения $p \in P$. Общая структура модели представлена в следующем виде:

$$X(t+n) = f(X(t), I_\phi(t+n), I_{gp}(t+n), I_{обш}(t+n), Er), t \in [0, T], \quad (1)$$

где $X(t+n)$ – вектор состояния за период $t \in [0, T]$, n – количество лет, характеризуемый количественными показателями заболеваемости, а также социально-экономическими и демографическими показателями исследуемого объекта управления; $X(t)$ вектор состояния на конец года t ; $I_\phi(t+n)$, $I_{gp}(t+n)$, $I_{обш}(t+n)$ – индексы наличия проблемы отдельного фактора, группы факторов и общий за период $(t+n)$; Er – показатели экономического эффекта от принятия решения – r , где $r \in R$.

Индекс « I », характеризуемый как предмет информационного управления, обеспечивая устранение «неопределенности», рассчитывался в качестве взвешенной суммы индексов наличия проблемы как для отдельных факторов риска (I_ϕ), так и для факторных групп (I_{gp}) с учетом суммарного влияния. При наличии всех доступных факторов и за счет приведения всех факторов к единой размерности можно было найти индекс общий ($I_{обш}$) [5]. При этом, используя ИНП, можно было не только проводить анализ текущей ситуации, но и прогнозировать ее развитие в дальнейшем с учетом того, что каждому выявленному сочетанию неблагоприятных событий K_{ij} ($j = 1, \dots, k_i$), реализуемое в результате принятия решения $R_i \in R$, а также событию N_i приписываются вероятности $p_i(K_{ij})$ и $p_i(N_j): 0 \leq p_i(K_{ij}) \leq 1$, которые соответствуют $\sum_{j=1}^{k_1} p_i(K_{ij}) + p_i(N_j) = 1$. Следовательно, если каждому сочетанию K_{ij} можно поставить описываемое последствие A_{ij} , то величина решения R_i риска I_i определяется по формуле:

$$I_i = \sum_{j=1}^{k_1} A_{ij} p_i(K_{ij}), \quad (2)$$

где K_j является средне-ожидаемой величиной ущерба при принятии варианта решения R_j .

При условии перевода данной проблемы в плоскость, когда преподаватель и обучающийся стремятся к информационному равновесию x_τ^* , $\tau \in \Sigma_+$, при выполнении условия, когда структура информированности I имеет конечную сложность v ; $\forall \lambda, \mu \in \Sigma_+ I_\lambda = I_\mu \Rightarrow x_\lambda^* = x_\mu^*$; $\forall i \in \forall \sigma \in \Sigma$; включая в нее $x_{\sigma i}^* \in \text{Arg max}_{x_i \in X_i} f_i(\theta_{\sigma i}, x_{\sigma i-1}^*, \dots, x_{\sigma i, i-1}^*, x_i, x_{\sigma i, i+1}^*, \dots, x_{\sigma i, n}^*)$, тогда при их одинаковой информированности данная структура минимальна и переходит в равновесие Нэша, делая вектор действий (x_1^*, \dots, x_n^*) равновесным.

Заключение. Таким образом, применение концепции равновесия Нэша при анализе образовательного процесса, в которое переходит информационное равновесие x_τ^* , $\tau \in \Sigma_+$, основывается на том, что условием принятия решения является наличие *общего знания* у всех участников данного процесса [10]. В результате проведенного исследования установлено, что этап принятия решения, реализуемый через выбор, является важным для всего механизма управления. Это обусловлено тем, что снижая «неопределенность» анализируемых параметров «проблемного поля», прежде всего, обеспечивается стабильность информационного равновесия. В связи с этим уместным будет отметить утверждение Р. Шеннона о том, что искусством моделирования могут овладеть те, кто обладает оригинальным мышлением, изобретательностью и находчивостью, равно как и глубоким знанием систем и физических явлений, которые необходимо моделировать. Не существует твердых и эффективных правил относительно того, как надо формулировать задачу в самом начале процесса моделирования, то есть сразу же после первого знакомства с ней [10]. При этом ни одно исследование не может дать единственного и окончательного решения проблемы. Накопление согласующихся результатов исследований в разных условиях дает больше уверенности в причинно-следственном характере связи, чем расходящиеся результаты. Совпадающие результаты подтверждают друг друга [3]. На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что оценка рассмотренной проблемы с позиции теории управления призвана мотивировать преподавателей, разработчиков образовательных программ и проектов на расширение представлений о содержательной части данного процесса с учетом профессиональной специфики и положений теории управления.

Библиографический список

1. Антонов А. В. Системный анализ : учебник для вузов / А. В. Антонов. – Москва : Высшая школа, 2004. – 17 с.
2. Бурков В. Н. Теория активных систем: состояние и перспективы / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – Москва : СИНТЕГ-ГЕО, 1999. – 128 с.
3. Власов В. В. Эпидемиология: учебное пособие для вузов / В. В. Власов. – 2-е изд., испр. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2005. – 30 с.
4. Звонарев С. В. Основы математического моделирования : учебное пособие / С. В. Звонарев. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. – 26 с.
5. Кожевников А. А. Применение индекса наличия проблемы при сравнительном анализе заболеваемости населения Российской Федерации, Сибирского федерального округа и Кемеровской области / А. А. Кожевников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 2 (46). – С. 22–30.
6. Мартемьянов Ю. Ф. Экспериментальные методы принятия решений : учебное пособие / Ю. Ф. Мартемьянов, Т. Я. Лазарев – Тамбов : Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2010. – 80 с.
7. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – Москва : МПСИ, 2005. – 584 с.
8. Новиков Д. А. Модели рефлексивного принятия решений / Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили // Проблемы управления. – 2004. – Вып. 4. – С. 62–70.
9. Хасанов Р. Ш. Дистанционное обучение – современные реалии / Р. Ш. Хасанов, Н. З. Юсупова, Е. Г. Игнашина, Е. Ю. Антропова, О. В. Данилова, Е. Ю. Юпатов, А. И. Хайруллина // Педагогика профессионального медицинского образования. – 2020. – № 2 (20). – С. 101–116.
10. Чхартишвили А. Г. Информационное равновесие: точечные структуры информированности / А. Г. Чхартишвили // Автоматика и Телемеханика. – 2003. – № 10. – С. 111–112.
11. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с англ. Р. Шеннон ; под ред. Е. К. Масловского. – Москва : Мир, 1978. – 425 с.

References

1. Antonov A. V. Sistemnyy analiz : uchebnik dlya vuzov [System analysis. Higher School of Economics: Textbook for higher education institutions]. Moscow, Vysshya shkola Publ., 2004. 17 p.
2. Burkov V. N. *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyaniye i perspektivy* [Theory of active systems: state and prospects]. Moscow, SINTEG-GEO Publ., 1999. 128 p.
3. Vlasov V. V. *Epidemiologiya : uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Epidemiology : a textbook for universities]. 2nd ed., correct. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2005. 30 p.

4. Zvonarev S. V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya : uchebnoye posobiye* [Fundamentals of mathematical modeling: a textbook]. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University, 2019. 26 p.

5. Kozhevnikov A. A. *Primenenie indeksa nalishy problem pri sravnitel'nom analize zabolevaemosti naseleniya Rossiyskoy Federatsii, Sibirskogo federal'nogo okruga i Kemerovskoy oblasti* [The use of the index of the presence of a problem in a comparative analysis of the incidence of the population of the Russian Federation, the Siberian Federal District and the Kemerovo Region]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2019, no. 2 (46), pp. 22–30.

6. Martemyanov Y. F. *Eksperimentalnyye metody prinyatiya resheniy : uchebnoye posobie* [Experimental methods of decision-making: textbook]. Tambov, Publishing House Tambov State Technician University, 2010. 80 p.

7. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, MPSI, 2005. 584 p.

8. Novikov D. A. *Modeli reflektivnogo prinyatiya resheniy* [Models of reflective decision-making]. *Problemy upravleniya* [Management Problems], 2004, issue 4, pp. 62–70.

9. Khasanov R. Sh. *Distantsionnoye obuchenie – sovremennyye realii* [Distance learning – modern realities]. *Pedagogika professional'nogo meditsinskogo obrazovaniya* [Pedagogy of professional medical education], 2020, no. 2 (20), pp. 101–116.

10. Chkhatishvili A. G. *Informatsionnoye ravnovesie: tochechnyye struktury informirovannosti* [Information balance: point structures of awareness]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2003, no. 10, pp. 111–112.

11. Shannon R., Maslovskiy Ye. K. (ed.) *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – isskustvo i nauka* [Simulation modeling of systems – art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978. 425 p.

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.054-061

УДК 623.746.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ ЗЕНИТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ

Статья поступила в редакцию 25.12.2020, в окончательном варианте – 15.04.2021.

Баитанник Николай Андреевич, филиал Астраханского государственного университета в г. Знаменске, 416540, Российская Федерация, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Островского, 16, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики и информатики, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3881-2309>; e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Погребняк Иван Сергеевич, филиал Астраханского государственного университета в г. Знаменске, 416540, Российская Федерация, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Островского, 16, начальник отдела, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Сироткин Алексей Николаевич, филиал Астраханского государственного университета в г. Знаменске, 416540, Российская Федерация, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Островского, 16, начальник лаборатории, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Светличкина Татьяна Николаевна, филиал Астраханского государственного университета в г. Знаменске, 416540, Российская Федерация, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Островского, 16, бакалавр, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Для принятия решения о серийном производстве зенитных управляемых ракет необходимо выполнить весь комплекс работ начиная от разработки технического задания на проектирование, изготовление и испытания готового изделия. На завершающем этапе испытаний на полигоне зенитная управляемая ракета проходит динамические испытания в соответствии с программой государственных испытаний. Для испытаний на полигоне кроме натурных испытаний ракет с использованием мишеней для их поражения, используются различные стенды и имитаторы, а также математическое моделирование в тех случаях, когда натурные испытания по некоторым причинам, например, чтобы не понести убытка, становятся невозможными, так как представляемый на испытания опытный образец изделия может быть в единственном экземпляре или его применение может принести огромные разрушения окружающей среде. В статье представлена разработка важной составляющей основного этапа исследования – взаимного влияния элементов рулевого тракта и панелей рулей при проведении динамических испытаний зенитных управляемых ракет. Представлены результаты работ по математическому и имитационному моделированию. Описаны возможности комплексной математической модели. Испытаниям подвергается инерциальная система управления зенитной управляемой ракетой, которая включает в себя цепи формирования рулевых трактов. Окончательно испытания рулевого тракта проводятся на собранной зенитной управляемой ракете с использованием автоматической контрольно-испытательной станции.

Ключевые слова: воздушно-космическая оборона, зенитная управляемая ракета, математическое моделирование, имитационная модель, аэродинамическая характеристика, рулевой привод, панель рулей, информационно-измерительная система

MODELLING OF AERODYNAMIC PARAMETERS OF STEERING DRIVES OF THE ANTI-AIRCRAFT GUIDED MISSILE

The article was received by the editorial board on 16.03.2021, in the final version – 20.04.2021.

Bashannik Nikolay A., branch of the Astrakhan State University in Znamensk, 16 Ostrovskiy St., Znamensk, the Astrakhan region, 416540, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department of Mathematics and Information Science, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Pogrebnyak Ivan S., branch of the Astrakhan State University in Znamensk, 16 Ostrovskiy St., Znamensk, the Astrakhan region, 416540, Russian Federation, head of department, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

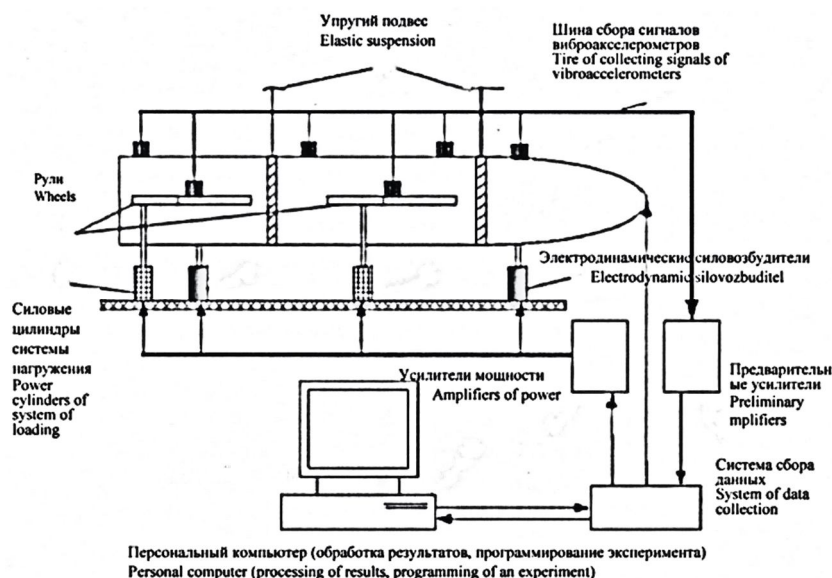
Sirotkin Alexey N., branch of the Astrakhan State University in Znamensk, 16 Ostrovskiy St., Znamensk, the Astrakhan region, 416540, Russian Federation, chief of laboratory, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

Svetlichkina Tatyana N., branch of the Astrakhan State University in Znamensk, 16 Ostrovskiy St., Znamensk, the Astrakhan region, 416540, Russian Federation, bachelor, e-mail: bna-kandidat@rambler.ru

To make a decision on the serial production of anti-aircraft guided missiles, it is necessary to perform a whole range of work ranging from the development of a technical task for the design, manufacture and testing of the finished product. In the final stage of testing at the test site, the anti-aircraft missile is undergoing dynamic tests in accordance with the state test program. For testing at the test site, in addition to on-site tests of missiles using targets to defeat them, various stands and simulators are used, as well as mathematical simulations in cases where in-kind tests for some reasons, for example, in order not to incur losses, become impossible, as the prototype of the product submitted for testing can be in a single instance or its application can bring huge destruction to the environment. The article presents the development of an important component of the main stage of the study - the mutual influence of elements of the steering tract and panels of the rudders during dynamic tests of anti-aircraft guided missiles. The results of the work on mathematical and simulation modeling are presented.

Keywords: aerospace defense, mathematical modeling, simulation model, anti-aircraft guided missile, aerodynamic characteristic, steering drive, panel of wheels

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Для ведения борьбы со средствами воздушно-космического нападения вероятного противника Воздушно-космические силы России имеют в своем составе зенитные ракетные войска, в состав которых входят зенитные ракетные системы и комплексы, оснащенные зенитными управляемыми ракетами (ЗУР).

Для принятия решения о серийном производстве ЗУР, они подвергаются государственным испытаниям на полигоне Заказчика в соответствии с Программой государственных испытаний.

Важным этапом натурных испытаний ЗУР являются динамические испытания зенитных управляемых ракет в целом, а также их отдельных элементов.

Постановка задачи. Провести динамические испытания ЗУР с целью определения частотных характеристик рулевых приводов и элементов тракта системы управления;

исследовать динамические характеристики ЗУР необходимых для уточнения математических моделей расчета;

определить коэффициенты систем уравнения движения ЗУР при математическом моделировании;

исследовать характер динамической реакции конструкции ЗУР на определенные виды воздействий;

испытания рулевого тракта провести на собранной ЗУР с использованием автоматической контрольно-испытательной станции.

Разработка математической модели. Одной из важнейших составляющих этапа натурных испытаний зенитных управляемых ракет являются их динамические испытания изделий в целом и их отдельных компонентов [1].

Зенитные управляемые ракеты разрабатываются для уничтожения высокоточных маневренных средств воздушно-космического нападения вероятного противника. Они обладают малым временем реакции на угрозы, что приводит к требованию больших скоростей полета и уровней допустимых перегрузок [2].

На рисунке 1 отображены силы, действующие на ракету движущейся со скоростью V_p .
 Здесь тяга двигателя P , она направлена по продольной оси ракеты;
 G – сила веса, которая приложена к центру тяжести ракеты и направлена к центру Земли;
 R – аэродинамическая сила. Она приложена к центру тяжести ракеты, постоянно меняет свое направление и величину и характеризуется полным аэродинамическим моментом;

M_R – полный аэродинамический момент. Он складывается из трех моментов – стабилизирующего, демпфирующего и управляющего. Под воздействием аэродинамических сил в полете ракеты возникают автоколебания элементов конструкции, которые могут привести к полному ее разрушению.

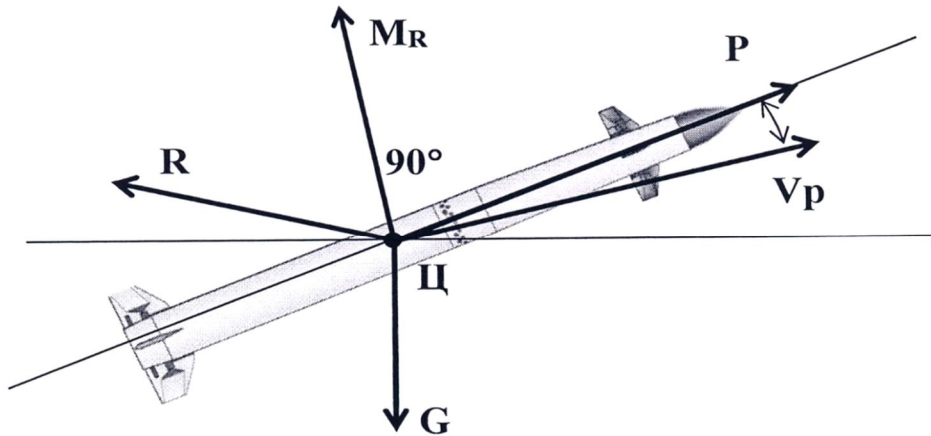


Рисунок 1 – Силы, действующие на ракету в полете

Основными неблагоприятными факторами являются колебания панелей рулей [3]. На рисунке 2 изображены силы, действующие на поверхности руля.

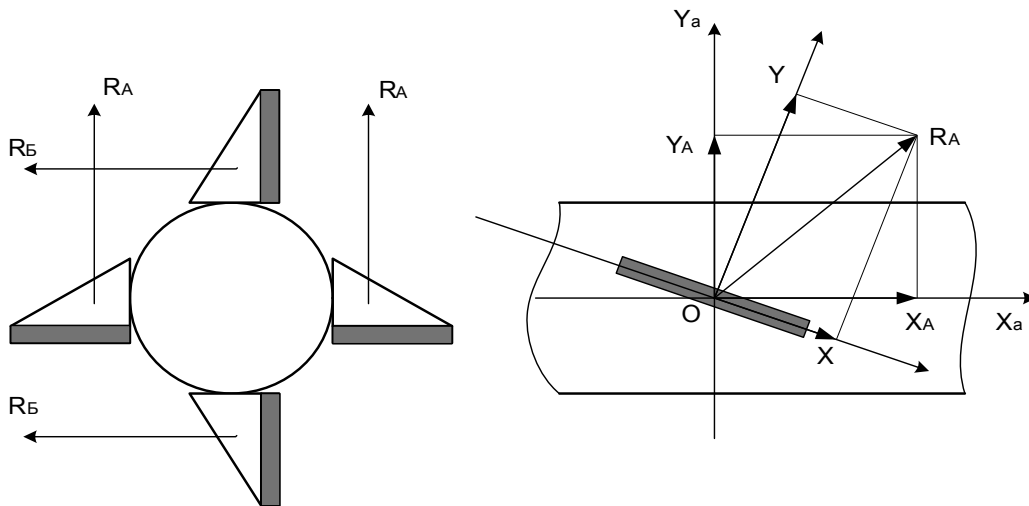


Рисунок 2 – Распределение сил, действующих на поверхность руля

Равнодействующую сил, действующих на рули ракеты в полете, называют полной аэродинамической силой R_A . В расчетах обычно используют не значения полной аэродинамической силы R_A , а ее составляющими – проекциями на оси скоростной или связанной системы координат при отсутствии угла скольжения.

$$R_A = C_R^A S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

$$X_A = C_X^A S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

$$Y_A = C_y^A S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3)$$

где $\frac{\rho V^2}{2}$ – скоростной напор набегающего потока, S – площадь руля в плане.

Коэффициентами систем уравнения движения ЗУР при математическом моделировании являются C_R^A, C_X^A, C_Y^A [4]. Они для удобства расчетов не имеют размерности, зависят от формы руля, его положения в воздушном потоке и от физических свойств воздуха. Путем продувки моделей рулей в аэродинамической трубе определяются соответствующие коэффициенты аэродинамических сил.

В результате воздействия перечисленных выше сил аэродинамические рули имеют большую величину центробежного момента.

Зенитные управляемые ракеты конструктивно обычно представляются четырьмя рулями, стабилизаторами или другими органами управления в соответствии с принятой аэродинамической схемой [5]. Оси рулей вставляются в стаканы рулевого шпангоута, подшипники двух поясов крепления оси при этом разносятся по длине оси для уменьшения величин реакций в подшипниках и соответственного снижения момента трения рулевых трактов. Поэтому рулевой шпангоут имеет достаточно большую высоту и амплитуду изгиба в своей плоскости.

При полете ЗУР присутствуют формы взаимного влияния панелей руля и рулевого тракта, которые передаются на систему управления и корпус летательного аппарата. На рисунке 3 показаны формы колебаний четырех стабилизаторов на упругом шпангоуте. Значения эквивалентной податливости ($1/K$) соответственно равны [6]:

$$\frac{1}{K} = \left\{ \frac{0,392R}{EJ}; \frac{0,148R}{EJ}; -\frac{0,148R}{EJ}; -\frac{0,132R}{EJ} \right\}, \quad (4)$$

где R – радиус оси шпангоута; EJ – изгибная жесткость сечения шпангоута; K – эквивалентная жесткость.

Частоты колебаний при этом равны корню квадратному из отношения эквивалентной жесткости к моменту инерции одного стабилизатора относительно оси шпангоута

$$f = \sqrt{\frac{K}{M_{ст}}}, \quad (5)$$

где $M_{ст}$ – момент инерции стабилизатора относительно оси шпангоута.

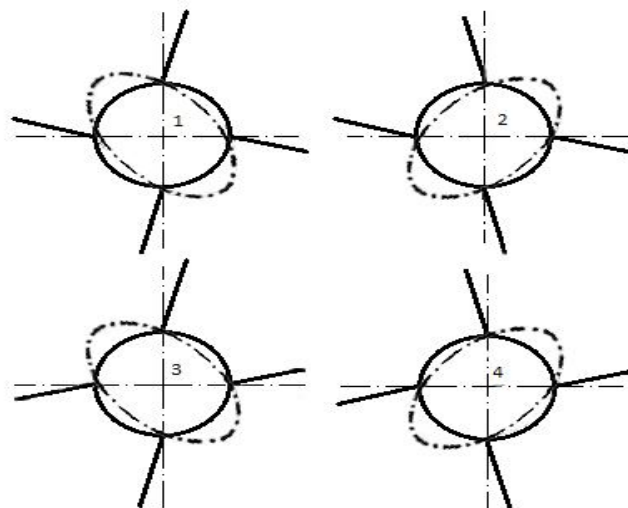


Рисунок 3 – Формы колебаний стабилизаторов на упругом шпангоуте

При исследовании рулевого тракта испытаниям подвергается механизм управления рулем. Аэродинамический руль связан с рулевым приводом механизмом управления, который практически не может быть выполнен без люфтов. Сам привод также имеет как люфты, так и электрические зоны нечувствительности, которые математически интерпретируются как люфты. При малых амплитудах отклонения руля люфты значительно снижают частоту собственных колебаний. Она в этом случае определяется соотношением амплитуды колебаний и величины люфта [7].

На рисунке 4 представлен идеализированный график зависимости усилия от перемещения рулей при наличии люфта.

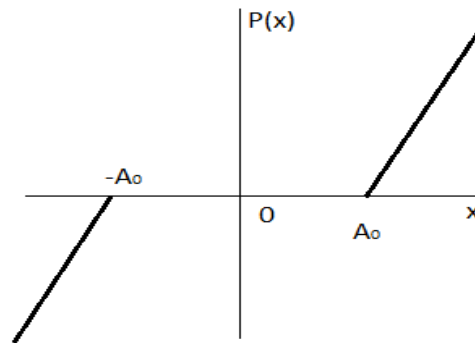


Рисунок 4 – График формы идеализированного люфта

На участке $x \geq A_0$ решение неоднородного уравнения колебания системы с одной степенью свободы без учета демпфирования имеет вид:

$$x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t + A_0 \quad (6)$$

при начальных условиях $x(0) = A$ и $x'(0) = 0$. После определения постоянного времени движения от A до A_0 определится выражением $t_1 = \pi/2\omega$, а на участке свободного движения от A_0 до 0 оно равно $t_2 = A_0/[(A - A_0)\omega]$. Сложив эти два значения и умножив на четыре, так как конструкция ЗУР обычно представлена четырьмя рулями, получим величину периода T . Соответственно, выражение для частоты колебаний ω_0 указанного нелинейного звена управления имеет вид [8]:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \omega \left(1 + \frac{2}{\pi \left(\frac{A}{A_0} - 1 \right)} \right)^{-1} \quad (7)$$

Для автономного рулевого привода при испытаниях определяется его динамическая жесткость. При этом инерционной массой штока пренебрегают. Динамической жесткостью, являющейся функцией частоты, называется отношение модуля суммы векторных сил к амплитуде внешнего гармонического перемещения и соотношение фаз указанных величин.

$$C(\omega) = \frac{P(\omega)}{y_p(\omega)}, \quad (8)$$

где $C(\omega)$ – динамическая жесткость рулевого привода; $P(\omega)$ – сумма векторных сил, действующих на рулевой привод; $y_p(\omega)$ – внешнее гармоническое перемещение привода.

Для всех типов приводов динамическая жесткость является нелинейной функцией частоты [9].

Метод проведения испытаний и использования их результатов при математическом моделировании. Испытаниям подвергается инерциальная система управления (ИСУ), которая включает в себя цепи формирования сигналов управления для рулевых трактов. На вход рулевого тракта последовательно подается набор сигналов, соответствующий некоторому значению угла отклонения руля. Привод закрепляется на корпусе вибростенда, который через датчик силы задает гармонические колебания штока в диапазоне исследуемых частот. При нулевой инерционной силе внешнее воздействие уравнивает векторную сумму упругой и демпфирующей составляющих рулевого привода. В этом случае величина сдвига фазы связана с декрементом колебаний привода выражением:

$$\varepsilon = 2\pi t g \varphi / \sqrt{4 - t g^2 \varphi}, \quad (9)$$

где φ – величина сдвига фазы; ε – декремент колебаний привода.

По результатам статических и динамических испытаний для исследуемой нелинейной модели при принятых значениях амплитуды и частоты колебаний находят эквивалентные значения всего двух параметров – коэффициентов жесткости и демпфирования рулевого тракта.

На практике при проведении испытаний ЗУР для определения эквивалентных значений параметров жесткости и демпфирования используется следующий метод [10]:

– угловому перемещению руля на механизме управления рулем с частотой (7) присваивается индекс «1» (φ_1);

– перемещению штока рулевого привода, приведенному к углу поворота, индекс «2» (φ_2).

Данные значения подставляют в систему двух уравнений, соответствующих неоднородному уравнению колебания системы, которое записывается в виде [11]:

$$\begin{cases} J\varphi_1 + k_{рл}(\varphi_1 - \varphi_2) + h_{рл}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) = M; \\ -k_{рл}(\varphi_1 - \varphi_2) - h_{рл}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + k_{рп}\varphi_2 + h_{рп}\dot{\varphi}_2 = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где J – импульс ударного ускорения; $k_{рл}$ – коэффициент демпфирования руля; $h_{рл}$ – коэффициент жесткости руля; $k_{рп}$ – коэффициент демпфирования штока привода; $h_{рп}$ – коэффициент жесткости штока рулевого привода; M – внешний момент.

Отметим, что система нелинейных уравнений соответствует некоторому значению амплитуды и частоты колебаний. Для установившихся гармонических колебаний, найдя из второго уравнения зависимость φ_2 от φ_1 , подставив ее в первое уравнение и опуская индекс «1», получим

$$J\ddot{\varphi} + k(\omega)\varphi + h(\omega)\dot{\varphi} = M_0, \quad (11)$$

где M_0 – амплитуда внешнего гармонического момента; ω – частота колебаний, в котором эквивалентные значения двух искомых параметров равны [11]:

$$\begin{cases} k(\omega) = \frac{k_{рл}k_{рп}(k_{рл} + k_{рп}) + (k_{рл}h_{рл}^2 + k_{рп}h_{рп}^2)\omega^2}{(k_{рл} + k_{рп})^2 + (h_{рл} + h_{рп})^2\omega^2}; \\ h(\omega) = \frac{k_{рл}^2h_{рп} + k_{рп}^2h_{рл} + h_{рл}h_{рп}(h_{рл}^2 + h_{рп}^2)\omega^2}{(k_{рл} + k_{рп})^2 + (h_{рл} + h_{рп})^2\omega^2}. \end{cases} \quad (12)$$

Эквивалентное значение декремента при этом определится выражением:

$$\varepsilon = 2\pi h(\omega) \sqrt{\frac{1}{4Jk(\omega) - h^2(\omega)}}. \quad (13)$$

Окончательно испытания рулевого тракта проводятся на собранной ЗУР с использованием автоматической контрольно-испытательной станции (АКИС). С помощью АКИС, подключенной к ЗУР, имитируется полет ракеты по заданной траектории. При этом в «полетном времени» функционирует комплекс ее бортовой аппаратуры, производится переключение коэффициентов контура стабилизации, определяемое изменением величины скоростного напора на моделируемой траектории. Для имитации процесса наведения ракеты на цель дополнительно подключается специальный стенд. Он, в соответствии с математической моделью наведения (установленной на компьютер в виде программы, работающей в режиме реального времени), перемещает по указанному стенду имитатор цели с доплеровским изменением частоты отраженного сигнала и имитатор излучения целью помех. АКИС должна функционировать в режиме «замороженных» коэффициентов. Информационная система управления (ИСУ) должна подать на вход исследуемого рулевого тракта сигнал, соответствующий заданному постоянному значению угла отклонения руля. В состав АКИС должно входить устройство создания вибраций, включающее следующие объекты: быстродействующий переключатель; прибор фазового вращения частоты вибраций, программируемый усилитель; информационный ограничитель уровня колебаний. При проведении испытаний вначале корпус ракеты вибрационным стендом выводится на заданный уровень перегрузки.

Стенд можно расположить под рулями или в другой точке, при этом должна быть сохранена амплитуда обобщенного усилия. Управляется стенд по амплитуде задающего датчика через усилители мощности с помощью генератора синусоидальных сигналов. Затем быстродействующий переключатель разъединяет цепь подачи сигнала с задающего датчика и замыкает цепь подачи сигнала с датчика, установленного на руле. Этот сигнал пропорционален амплитуде угла отклонения руля. Сигнал с датчика следует подавать через узкополосный следящий фильтр, программируемый усилитель и прибор фазового вращения. Пропорциональность сигнала определяется величиной амплитуды аэродинамического усилия, действующего в исследуемой точке виртуальной траектории ЗУР. Настроив фазу этого сигнала, можно имитировать полет ЗУР. Ограничитель уровня необходим для предотвращения разрушения ракеты при выходе на большие уровни перегрузки.

При математическом моделировании мы зачастую отмечаем наличие неустойчивости к самовозбуждающимся колебаниям. Однако в полете ЗУР это явление не наблюдается. Обычно при создании математической модели корпус ракеты «разрезается» вдоль продольной оси пополам, стыкуется с моделью одного руля и затем проводится математическое моделирование [12]. При создании математической модели расчета устойчивости ракеты к самовозбуждающимся колебаниям мы во многих формулах проводили линеаризацию моделей [13]. Колебания обычно возникают на режимах полета с максимальными величинами скоростного напора. Реализовать эти режимы по выбору траектории, начальной температуре заряда твердого топлива и составу пороха достаточно сложно [14]. Поэтому степень адекватности математической модели лишь приближена к реальным условиям, а результаты не могут быть идеальными [15].

Заключение. Итак, в данной работе было сделано следующее:

– приведен порядок динамических испытаний ЗУР с целью определения частотных характеристик рулевых приводов и элементов тракта системы управления;

- приведен порядок исследования динамических характеристик ЗУР, необходимых для уточнения математических моделей расчета;
- определены коэффициенты систем уравнения движения ЗУР при математическом моделировании;
- приведен порядок исследования характера динамической реакции конструкции ЗУР на определенные виды воздействий;
- испытания рулевого тракта были проведены на собранной ЗУР с использованием автоматической контрольно-испытательной станции.

Библиографический список

1. Андреев Г. И. Основы теории принятия решений / Г. И. Андреев, П. А. Созинов, В. А. Тихомиров ; под ред. П. А. Созинова. – Москва : Радиотехника, 2017. – 648 с.
2. Баштанник Н. А. Дифференциальные уравнения и математическое моделирование физических процессов на ЭВМ : учебное пособие / Н. А. Баштанник. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2018. – 132 с.
3. Баштанник Н. А. Теория вероятностей и математическое моделирование случайных процессов на ЭВМ : учебное пособие / Н. А. Баштанник. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2017. – 132 с.
4. Баштанник Н. А. Математическое моделирование процесса флаттера в полете зенитной управляемой ракеты / Н. А. Баштанник, К. Ю. Абрашев, В. И. Лобейко, И. С. Погребняк // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2018. – № 13 (223). – С. 7–12.
5. Буньков В. Г. Сравнительный анализ методов расчета аэродинамических сил на колеблющемся крыле в сверхзвуковом потоке / В. Г. Буньков, Э. Н. Набиуллин // Труды ЦАГИ. – 2007. – № 2118.
6. Бычков А. В. Опыт расчётно-экспериментальной оценки аэроупругой устойчивости и флаттера беспилотного летательного аппарата / А. В. Бычков, А. П. Педора, В. И. Смыслов // ТВФ. – 2009. – Т. LXXXII, № 1.
7. Вторая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов 2011 : сборник докладов / под ред. П. А. Созинова. – Москва : Радиотехника, 2012. – 392 с. : ил.
8. Ишмуратов Ф. З. Объединённая математическая модель летательного аппарата с системой управления для исследования аэроупругого взаимодействия / Ф. З. Ишмуратов, В. Н. Поповский // ТВФ. – 2012. – Т. LXXXIII, № 2.
9. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / под ред. П. А. Созинова, И. Н. Глушкова. – Тверь, 2013. – 528 с.
10. Карклэ П. Г. Электромеханическое моделирование в задачах аэроупругости / П. Г. Карклэ, В. И. Смыслов. – Москва : Полет, 2008. – № 10.
11. Лобейко В. И. Современные подходы к организации испытаний сложных систем / В. И. Лобейко. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2006. – 367 с.
12. Мельников И. В. Роль испытаний в оптимизации процесса проектирования изделий ракетно-космической техники / И. В. Мельников // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 2. – С. 38–41.
13. Парафесь С. Г. Методы и средства обеспечения аэроупругой устойчивости беспилотных летательных аппаратов / С. Г. Парафесь, В. И. Смыслов. – Москва : Издательство МАИ, 2013.
14. Созинов П. А. Актуальные задачи математического моделирования систем воздушно-космической обороны / П. А. Созинов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2017. – № 3. – С. 17–26.
15. Старусев А. В. Оптимизация технологии подготовки и проведения экспериментов с использованием имитационного моделирования / А. В. Старусев, В. И. Лобейко, С. А. Горемыкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2017. – № 8 (203). – С. 40–44.

References

1. Andreev G. I., Sozinov P. A. (ed.), Tikhomirov V. A. *Osnovy teorii prinyatiya reshcheniy* [The basics of decision theory]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 648 p.
2. Bashtannik N. A. *Differentsialnyye uravneniya i matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov na EVM : uchebnoye posobiye* [Differential equations and mathematical modeling of physical processes on a computer: study guide]. Astrakhan, Astrakhan University Publishing House, 2018. 132 p.
3. Bashtannik N. A. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskoye modelirovaniye sluchaynykh protsessov na EVM : uchebnoye posobiye* [Probability theory and mathematical modeling of random processes on a computer: study guide]. Astrakhan, Astrakhan State University, 2017. 132 p.
4. Bashtannik N. A., Abrachev K. Yu., Lobeykov V. Y., Pogrebnyak I. S. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessa flattera v polete zenitnoy upravlyayemoy rakety* [Mathematical modeling of process of the flutter in flight of the anti-aircraft guided missile]. *News of the Volgograd State Technical University. Seriya. Aktualnye problemy upravleniya, vychislitelnoi tehnik i informatiki v tehnicheskikh sistemah* [Urgent Problems of Management. Series. Computer Facilities and Information Science in Technical Systems], 2018, no. 13 (223), pp. 7–12.

5. Bunkov V. G., Nabiullin E. N. Sravnitelnyy analiz metodov raschota aerodinamicheskikh sil na koleblyushchemsya kryle v sverkhzvukovom potoke [Comparative analysis of computational methods of aerodynamic forces on the e fluctuating wing in the supersonic flow]. *Trudy ZAGI* [Proceedings of CAHI], 2007, no. 2118.
6. Buchkov A. V., Pedor A. P., Smyslov V. I. Opyt raschotno-eksperimentalnoy otsenki aerouprugoy ustoychivosti i flattera bespilotnogo letatel'nogo apparata [Experience of rated and experimental assessment of the aeroelastic stability and flutter of the unmanned aerial vehicle]. *TVF* [TVF], 2009, vol. LXXXII, no. 1.
7. *Vtoraya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov 2011 : sbornik dokladov* [The second scientific and technical conference of young scientists and specialists 2011 : proceedings]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 392 p. : il.
8. Ishmuratov F. Z., Popovsky V. N. Obyedinonnaya matematicheskaya model letatel'nogo apparata s sistemoy upravleniya dlya issledovaniya aeroupru-gogo vzaimodeystviya [The integrated mathematical model of the aircraft with the control system for the research of the aeroelastic interaction]. *TVF* [TVF], 2012, vol. LXXXIII, no. 2.
9. Sozinova P. A., Glushkova I. N. (ed.) *Imitatsionnoye modelirovaniye boyevykh deystviy: teoriya i praktika* [Imitation simulation of combat: theory and practice]. Tver, 2013. 528 p.
10. Karkle P. G., Smyslov V. I. *Elektromekhanicheskoye modelirovaniye v zadachakh aerouprugosti* [Electromechanical modeling in problems of aeroelasticity]. Moscow, Polet Publ., 2008, no. 10.
11. Lobeiko V. I. *Sovremennyye podkhody k organizatsii ispytaniy slozhnykh sistem* [Modern approaches to the organization of testing of complex systems]. Astrakhan, Astrakhan State University, 2006. 367 p.
12. Melnikov I. V. Rol ispytaniy v optimizatsii protsessa proyektirovaniya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Role of testing in optimizing the process of designing products of rocket and space technology]. *Molodoy ucheniy* [Young Scientist], 2011, vol. 1, no. 2, pp. 38–41.
13. Parafes S. G., Smyslov V. I. *Metody i sredstva obespecheniya aerouprugoy ustoychivosti bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Methods and means of ensuring of the aeroelastic stability of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Publishing house of MAI, 2013.
14. Sozinov P. A. Aktualnyye zadachi matematicheskogo modelirovaniya sistem vozdušno-kosmicheskoy oborony [Urgent problems of mathematical modeling of systems of aerospace defense]. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»* [Bulletin of Concern VKO «Almaz-Antey»], 2017, no. 3, pp. 17–26.
15. Starusev A. V., Lobeyko V. I., Goremykin. S. A. Optimizatsiya tekhnologiy podgotovki i provedeniya eksperimentov s ispolzovaniyem imitatsionnogo modelirovaniya [Optimization of technology of preparation and carrying out experiments with use of simulation modeling]. *News of the Volgograd State Technical University. Ser. Aktualnye problemy upravleniya, vychislitelnoi tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemah* [Ser. Urgent Problems of Management, Computer Facilities and Information Science in Technical Systems], 2017, no. 8 (203), pp. 40–44.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.062-070
УДК 004.421.5

ВАРИАНТ АЛГОРИТМА ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ДВОИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, ОСНОВАННЫЙ НА СВОЙСТВАХ ЛИНЕЙНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ¹

Статья поступила в редакцию 30.03.2021, в окончательном варианте – 30.04.2021.

Кулешова Елена Александровна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б, аспирант, ORCID 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru

Марухленко Анатолий Леонидович, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-3575-924X, e-mail: prohu33@mail.ru

Добрица Вячеслав Порфирьевич, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б, доктор физико-математических наук, профессор, ORCID 0000-0001-7533-3684, e-mail: dobritsa@mail.ru

Таныгин Максим Олегович, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru

Плугатарев Алексей Владимирович, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б, аспирант, ORCID 0000-0002-8549-4382, e-mail: aplugatarov@bk.ru

Статья посвящена разработке линейной системы генерации псевдослучайной последовательности на основе клеточных автоматов, разработка модели для нескольких генераторов нелинейных псевдослучайных последовательностей с практическими приложениями в системах симметричного преобразования данных. Такая модель генерирует все решения линейных бинарных разностных уравнений. Важно отметить, что многие из этих решений представляют собой псевдослучайные последовательности ключевого потока. В процессе разработки линейной системы на основе клеточных автоматов рассматриваются две основные структуры: линейные разностные уравнения и одномерные линейные гибридные клеточные автоматы. В данной статье показано, что все решения линейных бинарных разностных уравнений могут быть реализованы с помощью линейных моделей на основе клеточных автоматов с применением «правила 90» и «правила 150». Разработана модель генерации псевдослучайных битовых последовательностей, наиболее применимая в системах связи с высокой скоростью передачи. Основным отличием данной модели является то, что она построена на исключительно последовательной конкатенации базового линейного автомата, что обуславливает простоту предлагаемой модели. Также был предложен алгоритм контроля целостности и аутентичности блочных данных на основе предложенного алгоритма генерации псевдослучайной последовательности. Практическая значимость состоит в том, что предложенная модель проста и может применяться в системах защиты информации на практике, в том числе в системах контроля аутентификации и целостности данных.

Ключевые слова: информационная безопасность, потоковая передача данных, клеточные автоматы, псевдослучайные двоичные последовательности, системы защиты конфиденциальной информации

A VARIANT OF THE ALGORITHM FOR GENERATING PSEUDO-RANDOM BINARY SEQUENCES BASED ON THE PROPERTIES OF LINEAR CELLULAR AUTOMATA

The article was received by the editorial board on 30.03.2021, in the final version – 30.04.2021.

Kuleshova Elena A., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation, graduate student, ORCID 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90069

Marukhlenko Anatoly L., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-3575-924X, e-mail: proxy33@mail.ru

Dobritsa Vyacheslav P., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Doct. Sci. (Physical and Mathematical), Professor, ORCID 0000-0001-7533-3684, e-mail: do-britsa@mail.ru

Tanygin Maxim O., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru

Plugatarev Alexey V., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
graduate student, ORCID 0000-0002-8549-4382, e-mail: aplugatarev@bk.ru

The article is devoted to the development of a linear system for generating a pseudo-random sequence based on cellular automata, the development of a model for several generators of nonlinear pseudo-random sequences with practical applications in symmetric data transformation systems. Such a model generates all solutions to linear binary difference equations. It is important to note that many of these solutions are pseudo-random keystream sequences. In the process of developing a linear system based on cellular automata, two main structures are considered: linear difference equations and one-dimensional linear hybrid cellular automata. This article shows that all solutions to linear binary difference equations can be implemented using linear models based on cellular automata using the "rule 90" and "rule 150". A model for generating pseudo-random bit sequences has been developed, which is most applicable in communication systems with a high transmission rate. The main difference of this model is that it is built on an exclusively sequential concatenation of a basic linear automaton, which determines the simplicity of the proposed model. Also, an algorithm for controlling the integrity and authenticity of block data was proposed based on the proposed algorithm for generating a pseudo-random sequence. The practical significance lies in the fact that the proposed model is simple and can be applied in information security systems in practice, including in authentication and data integrity control systems.

Keywords: information security, data streaming, cellular automata, pseudo-random binary sequences, confidential information protection systems

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Применение клеточных автоматов для генерации псевдослучайных последовательностей началось С. Вольфрамом, когда был предложен способ сокрытия данных, использующий генератор псевдослучайных последовательностей на основе одномерного клеточного автомата с периодическими границами и с использованием правила 30.

Клеточный автомат (КА) состоит из набора ячеек, организованных в виде регулярной сети. Каждая ячейка КА – это конечный автомат, который использует множество конечных состояний. Выделяют следующие основные свойства КА – дискретность, локальное взаимодействие, однородность и параллельную эволюцию [1]. Каждый год авторы посвящают клеточным автоматам большое

количество научных работ. Главная причина популярности КА, несмотря на их простоту, состоит в огромном потенциале, которым они обладают в моделировании сложных систем [2].

Главная цель данной статьи – это создание алгоритма генерации псевдослучайных бинарных последовательностей, основываясь на свойствах линейных клеточных автоматов. Данные последовательности используются в качестве ключа в поточных шифрах. Поточный шифр – это шифр симметричного способа шифрования, в котором каждый символ исходного текста преобразуется в символ шифротекста, в зависимости от используемого ключа.

В отличие от методов блочного преобразования данных при поточной обработке производится преобразование одного бита за одну операцию [3]. При применении поточного алгоритма шифрования отсутствует необходимость разбивать сообщение на целое число блоков достаточно большой длины. Таким образом, поточный шифр может работать в реальном времени, то есть, если передается поток символов, каждый символ может шифроваться и передаваться сразу [4, 5]. Также в данной статье был предложен алгоритм контроля целостности и аутентичности и блочных данных на основе предложенного алгоритма генерации псевдослучайной последовательности.

На данный момент в различных исследованиях представлено довольно большое разнообразие семейств псевдослучайных последовательностей [6]. Среди них стоит выделить псевдослучайные последовательности, основанные на регистрах сдвига с линейной обратной связью. Выходные последовательности таких типов определяются с помощью нелинейных функций для создания последовательностей бинарного потока ключей. Они могут генерироваться разными способами [7].

В данной работе показано, что одномерные линейные КА на основе правил 90/150 генерируют все решения линейных разностных уравнений с двоичными постоянными коэффициентами. Некоторые из этих решений соответствуют сгенерированным псевдослучайным потокам ключей. Таким образом, разработан простой КА, который является линейной моделью генерации нелинейной псевдослучайной битовой последовательности. Из-за линейности правил перехода КА моделирование этих основанных на КА структур является простым и эффективным.

Постановка задачи. Генерация псевдослучайных чисел – одна из важнейших задач в области защиты данных. Генераторы случайных чисел используются не только для генерации ключей, но и в других важных частях алгоритмов и протоколов защиты информации. Генератор псевдослучайных чисел – это детерминированный алгоритм, который производит числа, распределение которых неотличимо от равномерного.

В классическом случае сгенерированный случайный поток используется в качестве ключевого потока, с которым можно выполнить операцию XOR для открытого текста. Случайное число получается из центральной ячейки решетки КА. Затем в результате непрерывной эволюции КА получается поток случайных чисел. Выбор центральной ячейки в качестве источника случайных битов был основан на том, что в этой ячейке не было значимых статистических закономерностей.

В настоящее время регистры сдвига с линейной обратной связью являются наиболее популярной техникой при разработке генераторов псевдослучайных потоков из-за их компактной и простой конструкции. В контексте данной работы рассматривается задача генерации псевдослучайных бинарных последовательностей всех решений линейных разностных уравнений с учетом оператора сдвига.

Материалы и методы. Данный раздел посвящен краткому рассмотрению двух основных структур, использованных при разработке модели генератора бинарных последовательностей (линейные разностные уравнения и одномерные гибридные КА).

Линейные разностные уравнения. Рассмотрим следующие линейные разностные уравнения, учитывая бинарные коэффициенты:

$$(E^r \oplus \sum_{j=1}^r c_j E^{r-j})a_n = 0, \quad n \geq 0, \quad (1)$$

где $a_n \in GF(2)$ – n -й член двоичной последовательности $\{a_n\}$. $E_j = a_n + j$ – оператор сдвига, определяемый с учетом хронологии решений. $c_j \in GF(2)$ – постоянный двоичный коэффициент, r – целое число, а символ \oplus в данном контексте определяет операцию XOR. Характеристический многочлен r -степени уравнения (1) равен:

$$P(x) = x^r + \sum_{j=1}^r c_j x^{r-j} \quad (2)$$

и определяет отношение линейного повторения последовательности $\{a_n\}$. Это означает, что его n -й член a_n может быть записан как линейная комбинация предыдущих членов:

$$(a_n \oplus \sum_{j=1}^r c_j a_{n-j}) a_n = 0, n \geq r. \tag{3}$$

В дальнейшем $P(x)$ будет рассматривать в качестве тривиального полинома двоичных коэффициентов. При этом, если a – один из корней рассматриваемого полинома, то

$$a, a^2, a^{2^2}, \dots, a^{2^{(r-1)}} \in GF(2^r), \tag{4}$$

где Γ – множество корней многочлена. В этом случае решения уравнения (1) представляют собой последовательности вида:

$$a_n = \sum_{j=0}^{r-1} A^{2^j} a^{2^j n}, n \geq 0, \tag{5}$$

где A – произвольный элемент из $GF(2^r)$. Другими словами, $\{a_n\}$ – это последовательность псевдо шума (PN-последовательность) характеристического полинома $P(x)$ и периода $2^{(r-1)}$, чья начальная точка определяется значением A . Если $A=0$, то решение уравнения (1) – это тождественно нулевая последовательность.

Одномерный линейный гибридный клеточный автомат. Для выделения свойств линейных клеточных автоматов перейдем к рассмотрению гибридного линейного КА. Определим правила перехода, которые позволят привести КА к нетривиальным структурам [8].

Правила определяются кодом Вольфрама как «правило 90» и «правило 150». Оба правила определяются следующим образом:

1. Правило 90: $b_{n+1}^k = b_n^{k-1} \oplus b_n^{k+1}$.
2. Правило 150: $b_{n+1}^k = b_n^{k-1} \oplus b_n^k \oplus b_n^{k+1}$.

Таким образом, в момент времени $n+1$ содержимое k -й ячейки $b_{n+1}^k \in GF(2)$ зависит от содержимого в момент времени n либо двух разных ячеек (правило 90), либо трех разных ячеек (правило 150), где $k = 1, \dots, L$, где L – длина автомата. При этом двоичное содержимое L ячеек определяется состоянием автомата в момент времени n . Формальная форма записи автоматов данного типа дается L -набором $\Delta L = (d_1, d_2, \dots, d_L)$, где $d_k = 0$, если k -я ячейка проверяет правило 90, в то время как $d_k = 1$, если k -я ячейка проверяет правило 150. Кроме того, $\Delta k = (d_1, d_2, \dots, d_k)$, где $k = 1, \dots, L$ обозначает соответствующий подавтомат длины k .

На основе алгоритма синтеза Кеттелла и Муцио [9] получим два линейных 90/150 КА с характеристическим полиномом $Q(x)$. Следовательно, одномерный двоичный линейный клеточный автомат 90/150 с примитивным характеристическим полиномом $P(x)$, заданным формулой (2) будет генерировать PN-последовательность, определенную уравнением (5), данная последовательность в таблице 1 выделена жирным шрифтом. Далее перейдем к рассмотрению следующих вопросов:

1. Как решение уравнения (1) с характеристическим полиномом $P(x) = x^3 + x^2 + 1$, $r = 3$ и $A = 1 (a \in GF(2_3))$:

$$a_n = 1a^n \oplus 1a^{2n} \oplus 1a^{4n}, n \geq 0. \tag{6}$$

2. Как последовательность, генерируемая парой обратных КА, начиная с начальных состояний (1,0,1) и (1,1,0) соответственно. В остальных ячейках КА сдвинутые версии той же сгенерированной PN-последовательности.

Таблица 1 – PN-последовательность, полученная либо как решение разностного уравнения, либо как последовательность, порожденная двумя обратными линейными КА

	Начальное состояние						
	1	1	1	0	1	0	0
	КА						
150	1	1	1	0	1	0	0
90	0	0	1	1	1	0	1
90	1	0	0	1	1	1	0
150	1	1	1	0	1	0	0
90	1	1	0	1	0	0	1
90	0	1	0	0	1	1	1

Обобщение. Обобщим разностные уравнения в более сложную разновидность линейных разностных уравнений, корни которых имеют кратность больше 1. Фактически мы собираемся рассматривать уравнения вида:

$$(E^r \oplus \sum_{j=1}^r c_j E^{r-j})^p a_n = 0, n \geq 0, \quad (7)$$

где p – целое число > 1 . Таким образом, характеристический многочлен $P_M(x)$ будет иметь вид:

$$P_M(x) = P(x)^p = (x^r + \sum_{j=1}^r c_j x^{r-j})^p. \quad (8)$$

Получаем корни многочлена $P_M(x)$ и видим, что они совпадают с корнями у многочлена $P(x)$, т.е. $a, a^2, a^{2^2}, \dots, a^{2^{(r-1)}}$, но с кратностью p . Таким образом, решение уравнения (7) будет иметь следующий вид:

$$a_n = \sum_{i=0}^{p-1} \binom{n}{i} \sum_{j=0}^{r-1} A_i^{2^j} a^{2^{j n}}, \quad (9)$$

где A_i – произвольный элемент из $GF(2^r)$; $\binom{n}{i}$ – количество всех подмножеств размера i в n -м элементе (биномиальный коэффициент). В соответствии с уравнением (5) для последовательности с начальной точкой в A_i n -й элемент определяется как $\sum_{j=0}^{r-1} A_i^{2^j} a^{2^{j n}}$, из чего следует, что двоичная последовательность будет являться побитовой суммой одной и той же PN-последовательности, берущей начало из разных точек, при этом последовательность двоичных значений будет определяться коэффициентами $\binom{n}{i}$, период T_i остается постоянным. В таблице 2 представлены бинарные значения и значения периодов для коэффициентов $i = 0, \dots, 7$.

Характеристики бинарной последовательности определяются биномиальными коэффициентами A_i , являющимися решениями (7). Количество различных бинарных последовательностей определяется количеством различных p -кортежей значений A_i . Уравнения вида (7) в данном контексте имеют особое значение, это связано с тем, что упомянутые во введении двоичные последовательности имеют характеристические многочлены вида (8). Следовательно, многие двоичные последовательности – это решения уравнений вида (7).

Таблица 2 – Бинарные значения и периоды для биномиальных коэффициентов

Бинарные значения	Периоды T_i	Биномиальные коэффициенты $\binom{n}{i}$
1,1,1,1,1,1,1,1, ...	$T_1 = 1$	$i = 0$
0,1,0,1,0,1,0,1, ...	$T_2 = 2$	$i = 1$
0,0,1,1,0,0,1,1,0,0, ...	$T_3 = 4$	$i = 2$
0,0,0,1,0,0,0,1,0,0, ...	$T_4 = 4$	$i = 3$
0,0,0,0,1,1,1,1,0,0, ...	$T_5 = 8$	$i = 4$
0,0,0,0,0,1,0,1,0,0, ...	$T_6 = 8$	$i = 5$
0,0,0,0,0,0,1,1,0,0, ...	$T_7 = 8$	$i = 6$
0,0,0,0,0,0,0,1,0,0, ...	$T_8 = 8$	$i = 7$

Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости разработки простой линейной модели, позволяющей находить все решения этих разностных уравнений, с целью нахождения среди них псевдослучайных последовательностей.

Результаты и их обсуждение. Решение линейных разностных уравнений с помощью КА. В данной работе предлагается решение линейных разностных уравнений с помощью КА на основе конкатенации p раз базового автомата (так как $P_M(x) = P(x)^p$), при этом для каждого $P(x)$ существуют два обратных базовых автомата, которые могут использоваться в процедуре конкатенации.

Результат можно повторять несколько раз для последовательных многочленов и векторы правил:

$$P(x) \leftrightarrow \Delta_L = (d_1, d_2, \dots, d_L)$$

$$P(x)^2 \leftrightarrow \Delta_{2L} = (d_1, d_2, \dots, d_L, d_L, \dots, d_2, d_1)$$

$$P(x)^{2^2} \leftrightarrow \Delta_{2^2 L} = (d_1, d_2, \dots, d_L, d_L, \dots, d_2, d_1, d_1, d_2, \dots, d_L, d_L, \dots, d_2, d_1)$$

$$\vdots \leftrightarrow \vdots \quad \vdots$$

Таким образом, получаем КА, характеристические многочлены которого: $P(x)^2, P(x)^{2^2}, P(x)^{2^3}, \dots, P(x)^{2^q}$ длины $2L, 2^2 L, 2^3 L, \dots, 2^q L$ соответственно.

Численное моделирование. В качестве примера рассмотрим пару обратных КА, длиной $L = 5$, связанных с характеристическим многочленом $P(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$ (первый автомат $(1, 0, 0, 0, 0)$, второй автомат $(0, 0, 0, 0, 1)$). Если $P_M(x) = P(x)^p$ при $p = 4$, то один из КА, полученных путем конкатенации, будет иметь вид $(1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1)$, а его длина составит $L = 10$. Различные варианты A_i (не все нулевые) позволят нам сгенерировать решения уравнения (7).

1. Если $A_0 \neq 0$ и $A_i = 0, \forall_i > 0$, то клеточный автомат выдаст уникальную PN-последовательность $N_0 = 1$ последовательность периода $T_0 = 31$, линейная сложность которой составит $LC_0 = 5$ и характеристический многочлен $P(x)$. Кроме того, автоматные циклы дважды симметричны: $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ с $a_j \in GF(2)$. 31-е дважды симметричное состояние сосредоточено в одном и том же цикле.

2. Если $A_1 \neq 0$ и $A_i = 0, \forall_i > 1$, то клеточный автомат выдаст $N_1 = 16$ различных последовательностей периода $T_1 = 62$, линейная сложность $LC_1 = 10$ и характеристический многочлен $P(x)^2$. Кроме того, автомат проходит через симметричные состояния следующего вида: $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_9, a_8, a_7, a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ с $a_j \in GF(2)$. Существует $210 - 32 = 992$ симметричных состояний, распределенных в 16 циклах по 62 состояния в каждом из них.

3. Если $A_2 \neq 0$ и $A_i = 0, \forall_i > 2$, то клеточный автомат выдаст $N_2 = 256$ различных последовательностей периода $T_2 = 124$, линейная сложность $LC_2 = 15$ и характеристический многочлен $P(x)^3$. Кроме того, автомат проходит несколько циклов повторяющиеся состояния формы: $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ с $a_j \in GF(2)$.

4. Если $A_3 \neq 0$, то клеточный автомат выдаст $N_3 = 8192$ различных последовательностей периода $T_3 = 124$, линейной сложности $LC_3 = 20$ и характеристического полинома $P(x)^4$. Кроме того, автомат циклически перебирает состояния, не входящие в предыдущие циклы.

В итоге, простая линейная структура, основанная на КА, позволяет нам последовательно совершать конкатенацию для вычисления всех решений линейных двоичных разностных уравнений, некоторые из которых будут являться псевдослучайными бинарными последовательностями.

Сравнение с алгоритмом использования векторных дополнительных и перестановочных операций. Клеточные автоматы используют разными способами для генерации псевдослучайных криптографических последовательностей. Существует метод, в котором модель клеточного автомата генерирует бинарную последовательность при помощи алгоритма использования векторных дополнительных и перестановочных операций для расширения пространства логических функций [10].

В данном алгоритме перестановки n -арных логических функций и дополнительного алгоритма перестановка выполняется для $2^n!$; дополнительные исчерпывающие потребности 2^{2^n} операций для каждой из операций перестановки. Суммарная вычислительная сложность n -мерного варианта логической функции с использованием перестановки и дополнительного алгоритма – $2^n! \times 2^{2^n}$.

Вышеупомянутые характеристики делают псевдослучайную двоичную последовательность, сгенерированную данным шифром возможным только для блочных шифров, а применение линейных клеточных автоматов имеет очевидное преимущество при потоковом шифровании в реальном времени.

Использование алгоритма в системах контроля целостности и аутентичности блочных данных. Предлагаемый алгоритм может быть использован как алгоритмическая основа для реализации программных или аппаратных систем контроля целостности и аутентичности не только потоковых, но и блочных данных (рис. 1).

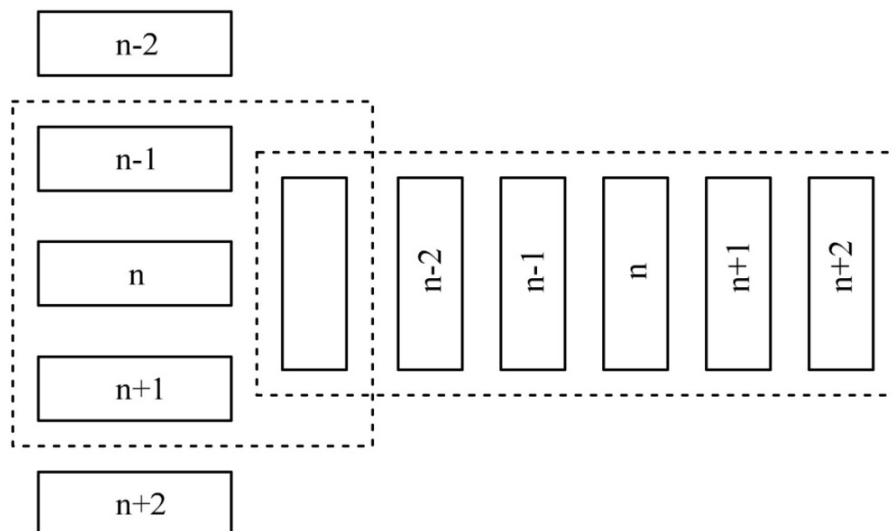


Рисунок 1 – Схема алгоритма контроля целостности и аутентичности данных для блочных данных

Если рассматривать поток блочных данных от источника к приемнику, то модель системы контроля реализуется следующим образом. Источник поддерживает счетчик количества принятых блоков, для которых процедура дала положительный результат (в нашем случае $n-1$). Вектор сформированных с помощью предлагаемого подхода псевдослучайных блоков данных длиной $l = l_1 + l_2$, используемых для декодирования поступающего пакета:

$$V^n = \{V_{n-l_1}, \dots, V_{n+l_2}\}, V_i = f(i, \text{ключ}) . \quad (10)$$

В данном случае, l_1 – параметр, определяющий, на какое максимальное число индекс поступающего информационного блока может быть меньше максимального индекса блоков, уже буферизированных к текущему моменту, чтобы может быть записанным в буфер; l_2 – показатель, показывающий, на какое максимальное число индекс поступающего информационного блока может превышать максимальный индекс блоков $n-1$, обработанных к текущему моменту. При этом равенство параметра l_1 единице будет означать невозможность для легальных информационных пакетов менять очередность поступления в приемник, так как в этом случае разница между индексами легальных информационных блоков, поступающих подряд в приемник, может иметь значение от 2 и более. Это увеличивает вероятность ошибки при передаче всего множества пакетов и накладывает высокие требования к протоколу связи, который должен гарантировать доставку блоков в исходном порядке. Все это потребует от системы связи буферизации, контроля очередности и выльется, в конечном счете, в снижение пропускной способности канала.

Поступающий информационных блок S проходит операцию декодирования для каждого из слов вектора:

$$F(S, V^n) = \{S_{n-l_1}, \dots, S_{n+l_2}\} . \quad (11)$$

В составе каждого информационного блока в момент его формирования до операции закрытия в источнике добавлены контрольные разряды, формируемые любым методом контроля целостности и обнаружения ошибок.

Каждое из полученных в результате декодирования слов $S_{n-l_1}, \dots, S_{n+l_2}$ проходит проверку на отсутствие ошибок:

$$F^{err}(\tilde{S}_{n-l_1}) = 1, \text{ если ошибок нет}$$

$$F^{err}(\tilde{S}_{n-l_1}) = 0, \text{ если ошибка}$$

В случае, если проверка ошибок для каждого слова дала 0, то поступивший пакет признается пакетом, сформированным не целевым, а посторонним источником. В случае, если проверка ошибок дала 1, для одного слова, то его индекс определяется как индекс поступившего пакета. В случае если проверка ошибок дала 1, для более чем одного слова, то произошла ошибка аутентификации.

Отличием предлагаемого метода является то, что затраты на его реализацию определяются размером вектора, с элементами которого сравнивается поступающее слово. А его размер, в свою очередь, определяется вероятностью возникновения ошибок в канале: чем она больше, тем большая длина вектора требуется для снижения вероятности ошибки непопадания индекса поступившего блока в диапазон $n-l_1 \dots n+l_2$. Кроме того, для повышения производительности, элементы проверочного вектора можно формировать до момента получения пакета.

Выводы. В данной статье показано, что все решения линейных бинарных разностных уравнений могут быть реализованы с помощью линейных моделей на основе клеточных автоматов при использовании правил 90/150. Примечательно, что некоторые из этих решений имеют прямое криптографическое применение в шифрах, потому что они представляют собой последовательности ключевого потока, созданные с помощью псевдослучайных генераторов.

Также стоит отметить, что генераторы псевдослучайных последовательностей, задуманные и спроектированные как нелинейные генераторы, здесь линеаризованы на клеточных автоматах. Процедура линеаризации проста и может применяться в ряде практических криптографических решениях. Эта характеристика делает алгоритм пригодным для разработки систем, в которых актуально оперативное выполнение в реальном времени, например, в системах связи с высокой скоростью передачи.

Предложен алгоритм применения псевдослучайной последовательности в системах контроля целостности и аутентичности блочных данных.

Библиографический список

1. Марухленко А. Л. Вариант организации многопоточной обработки конфиденциальных данных на базе клеточных автоматов / А. Л. Марухленко, А. В. Плугатарев, М. О. Таныгин, Л. О. Марухленко, Д. О. Бобынцев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 100–112.
2. Марухленко А. Л. Комплексная оценка информационной безопасности объекта с применением математической модели для расчета показателей риска / А. Л. Марухленко, А. В. Плугатарев, М. О. Марухленко, М. А. Ефремов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – Т. 8, № 4 (29). – С. 34–40.
3. Gollmann D. Clock-Controlled Shift Registers: A Review / D. Gollmann // IEEE Transactions on Selected Areas in Communications. – 1989. – Vol. 7, № 4. – pp. 525–533.
4. Марухленко А. Л. Программный модуль для оценки криптостойкости симметричных методов шифрования с использованием параллельных вычислений / А. Л. Марухленко, М. О. Марухленко, А. В. Плугатарев, В. П. Добрица // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Курск : ЮЗГУ, 2018. – С. 33–38.
5. Марухленко А. Л. Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации / А. Л. Марухленко, А. В. Плугатарев, М. О. Таныгин, Л. О. Марухленко, М. Ю. Шашков // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 108–121.
6. Кулешова Е. А. Программа для многопоточного шифрования на базе клеточных автоматов / Е. А. Кулешова, А. Л. Марухленко, В. П. Добрица, М. О. Таныгин, Л. О. Марухленко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664789, 13.11.2019. Заявка № 2019663418 от 29.10.2019. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41364754>. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 03.03.2021).
7. Марухленко А. Л. Анализ потенциальных уязвимостей и современных методов защиты многопользовательских ресурсов / А. Л. Марухленко, М. О. Марухленко, Е. Е. Конорева, М. О. Таныгин // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Курск : ЮЗГУ, 2018. – С. 136–140.
8. Wolfram S. Statistical mechanics of cellular automata / S. Wolfram // Reviews of Modern Physics. – 1983. – Т. 55 (3). – P. 601–644.
9. Sirakoulis G. C. Hybrid DNA Cellular Automata for pseudorandom number generation / G. C. Sirakoulis // International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS). – Madrid, Spain : IEEE, 2012. – P. 238–244.
10. Wan J. Permutation and Complementary Algorithm to Generate Random Sequences for Binary Logic / J. Wan, J. Zheng // Variant Construction from Theoretical Foundation to Applications. – 2019. – P. 237–245.

References

1. Marukhlenko A. L., Plugatarev A. V., Tanygin M. O., Marukhlenko L. O., Bobintsev D. O. Variant organizatsii mnogopotochnoy obrabotki konfidentsialnykh dannykh na baze kletochnykh avtomatov [A Variant of the Organization of Multithreaded Processing of Confidential Data Based on Cellular Automata]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Southwest State University], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 100–112.
2. Marukhlenko A. L., Plugatarev A. V., Marukhlenko L. O., Efremov M. A. Kompleksnaya otsenka informatsionnoy bezopasnosti obyektov s primeneniye matematicheskoy modeli dlya rascheta pokazateley riska [Comprehensive Assessment of the Information Security of an Object Using a Mathematical Model for Calculating Risk Indicators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of the Southwest State University], 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 34–40.
3. Gollmann D., Chambers W. C. Clock-Controlled Shift Registers: A Review. *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, 1989, vol. 7, no. 4, pp. 525–533.
4. Marukhlenko A. L., Marukhlenko L. O., Plugatarev A. V., Dobritsa V. P. Programmnyy modul dlya otsenki kriptostoykosti simmetrichnykh metodov shifrovaniya s ispolzovaniyem parallelnykh vychisleniy [Software Module for Evaluating the Cryptographic Strength of Symmetric Encryption Methods Using Parallel Computing]. *Infokommunikatsii i kosmicheskiye tekhnologii: sostoyaniye, problemy i puti resheniya : materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Infocommunications and Space Technologies: State, Problems and Solutions : Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, YUZGU, 2018, pp. 33–38.
5. Marukhlenko A. L., Plugatarev A. V., Tanygin M. O., Marukhlenko L. O., Shashkov M. Yu. Variant razgranicheniya dostupa k informatsionnym resursam na osnove neyavnoy autentifikatsii [Variant of Differentiation of Access to Information Resources Based on Implicit Authentication]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Bulletin of the Southwest State University], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 108–121.
6. Kuleshova E. A., Marukhlenko A. L., Dobritsa V. P., Tanygin M. O., Marukhlenko L. O. Programma dlya mnogopotochnogo shifrovaniya na baze kletochnykh avtomatov [A Program for Multithreaded Encryption Based on Cellular Automata]. *Certificate of registration of a computer program RU 2019664789, 11/13/2019. Application No. 2019663418 dated October 29, 2019*. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41364754> (accessed 03.03.2021).
7. Marukhlenko A. L., Marukhlenko L. O., Konoreva E. E., Tanygin M. O. Analiz potentsialnykh uyazvimostey i sovremennykh metodov zashchity mnogopolzovatel'skikh resursov [Analysis of Potential Vulnerabilities and Modern Methods of Protecting Multi-User Resources]. *Infokommunikatsii i kosmicheskiye tekhnologii: sostoyaniye, problemy i puti resheniya : materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Infocommunications and Space Technologies: State, Problems and Solutions : Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, YUZGU, 2018, pp. 136–140.
8. Wolfram S. Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Reviews of Modern Physics*, 1983, vol. 55 (3), pp. 601–644.
9. Sirakoulis G. C. Hybrid DNA Cellular Automata for Pseudorandom Number Generation. *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. Madrid, Spain, IEEE, 2012, pp. 238–244.
10. Wan J., Zheng J. Permutation and Complementary Algorithm to Generate Random Sequences for Binary Logic. *Variation Construction from Theoretical Foundation to Applications*, 2019, pp. 237–245.

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.071-0800
УДК 004.056.5

**МЕЖСУБЪЕКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
КАК ИСТОЧНИК ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА СУБЪЕКТЕ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ¹**

Статья поступила в редакцию 10.04.2021, в окончательном варианте – 12.05.2021.

Максимова Елена Александровна, Российский технологический университет МИРЭА, 119454, Российская Федерация, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78
кандидат технических наук, доцент, ORCID https://orcid.org/0000_0001_8788-4256, e-mail: maksimova@mire.ru

Садовникова Наталья Петровна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28
доктор технических наук, профессор, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7214-9432>, e-mail: npsn1@yandex.ru

С введением в 2017 г. №187-ФЗ, в Российской Федерации обозначены новые приоритеты на уровне обеспечения стабильности и информационной безопасности общества и государства в целом. В качестве приоритетных обозначены вопросы безопасности функционирования субъектов критической информационной инфраструктуры (СКИИ). Однако введенные по данному вопросу нормативно-правовые акты регуляторов рассматриваются без методической оценки межсубъектного взаимодействия на уровне КИИ. В это же время не учтен данный фактор при построении системы защиты на объектах КИИ снижает ее эффективность, приносит в систему деструктивный эффект и может рассматриваться как уязвимость на инфраструктурном уровне. В данной статье предложены элементы методологической базы рассмотрения межсубъектного взаимодействия как источника деструктивного воздействия на субъекте критической информационной инфраструктуры. Результатом выполненного анализа видов межсубъектных связей в рамках сфер функционирования КИИ является представленная классификация межсубъектных связей с выделенным набором свойств для каждого обозначенного класса. Преимущества предложенного подхода обосновываются с точки зрения системного подхода. Исследование показало тесную взаимосвязь и взаимовлияние сфер функционирования субъектов КИИ, что подчеркивает необходимость их учета в оценке и повышении уровня информационной безопасности КИИ для поддержания жизнедеятельности общества и государства.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, субъект, объект, взаимодействие, безопасность, деструктивное воздействие

**INTERSUBJECTIVE INTERACTION AS A SOURCE OF DESTRUCTIVE
INFLUENCES ON THE SUBJECT OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE**

The article was received by the editorial board on 10.04.2021, in the final version – 12.05.2021.

Maksimova Elena A., Russian Technological University MIREA, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID https://orcid.org/0000_0001_8788-4256, e-mail: maksimova@mire.ru

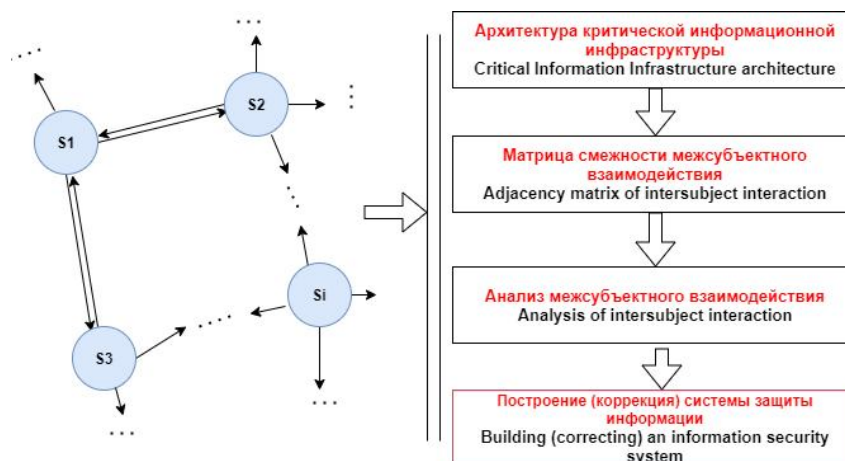
Sadovnikova Natalya P., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,
Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7214-9432>, e-mail: npsn1@yandex.ru

With the introduction of No. 187-FL in 2017, new priorities have been identified in the Russian Federation at the level of ensuring the stability and information security of society and the state as a whole. The issues of the security of the functioning of the subjects of the critical information infrastructure (CII) are identified as priorities. However, regulatory legal acts introduced on this issue are considered without a methodological assessment of intersubjective interaction at the level of the CII. At the same time, not taking this factor into account when building a security system at CII facilities reduces its effectiveness, brings a destructive effect to the system and can be considered as a vulnerability at the infrastructure level. In this article, the elements of the methodological basis for considering intersubjective interaction as a source of destructive influence on the subject of critical information infrastructure are proposed. The result of the analysis of the types of intersubjective relationships within the areas of functioning of the CII.

Keywords: critical information infrastructure, subject, object, interaction, security, destructive impact

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 3/2020).

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Одним из гарантов стабильности и информационной безопасности (ИБ) общества и государства в целом является безопасность функционирования субъектов критической информационной инфраструктуры (СКИИ), что определяется ФЗ-187 [1]. При этом существующие в настоящее время методы и модели оценки ИБ, применяемые к СКИИ, рассматриваются без учета оценки межсубъектного взаимодействия [2–7]. В это же время системный подход к решению данного вопроса позволяет говорить о наличии деструктивного эффекта от данного явления. Следовательно, не учет данного фактора при построении системы защиты на объектах КИИ снижает ее эффективность и может рассматриваться как уязвимость на инфраструктурном уровне.

Постановка задачи: Регулятивной особенностью и, на наш взгляд, противоречием, является введение самого понятия «субъект КИИ». Так, согласно ФЗ 187, под субъектом КИИ понимается юридическое лицо – собственник объектов КИИ. Объекты КИИ – информационные системы, телекоммуникационные системы, автоматизированные системы управления – самостоятельные единицы, функционирующие в рамках КИИ. Законодательством не упоминается о том, что объекты КИИ взаимодействуют между собой, да и само понятие «субъект КИИ» не представляется как система. Не рассматривается субъект КИИ (да и КИИ в целом) как система и в документах регуляторов, регламентирующих вопросы, связанные с безопасностью КИИ. Таким образом, на законодательном уровне не регламентируется наличие и учет взаимосвязей и взаимовлияний в структурных элементах КИИ. КИИ не рассматривается как системы. Здесь нарушается закон необходимого разнообразия Эшби, согласно которому, только постоянно изменяясь под воздействием окружающей среды, только отражая ее изменения, система может остаться собой, сохраняя свое качество. Нарушается и закон перехода количественных изменений в качественные, так как в процессе эволюции любой системы происходят накопление количественных изменений и переход их в качественные изменения [2]. Все это приводит к значительным погрешностям в оценке безопасности, защищенности, эффективности функционирования КИИ на всех уровнях.

Таким образом, предлагается рассматривать субъект КИИ – как систему взаимодействующих объектов КИИ, а также средств их связи, находящихся в собственности данного субъекта КИИ.

Терминологическая основа исследования. Не однозначно сточки зрения системного подхода будет определение КИИ. С одной стороны, КИИ можно рассматривать как совокупность объектов КИИ. С другой стороны, КИИ – это совокупность субъектов КИИ. Здесь, в первом определении наблюдается горизонтальная иерархия (по видам объектов), во втором – вертикально-иерархическая структура. В данном исследовании остановимся на уровне субъектов КИИ как структурных составляющих, самостоятельных системных единицах.

Исследование вопросов безопасности КИИ не возможно без рассмотрения всеобщего свойства любой материи – системность. Исходным понятием в данном случае выступает понятие «система». Согласно БСЭ «система (от греч. systema – целое, состоящее из частей; соединение) – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность, единство» [8], что определяет содержание данной категории через ее составляющие: элементы, связи, отношения.

Элемент – «примитивная» составляющая системы, основные характеристики которой неразложимость и неделимость в пространстве и во времени, с одной стороны. С другой стороны – элементы являются фундаментальными образующими системы, так как без них система не существует.

Системный подход, как методологическая база научных исследований, в том числе определяет законы функционирования системы через систему связей. При этом связи рассматриваются так же как «элементарные частицы», через которые реализуется взаимодействие между элементами.

Связи между элементами в системе образуют отношения данного вида. Последнее, в свою очередь, определяет вид и функционал системы, определяет ее структуризацию. В данном контексте можно говорить о различных видах отношений между элементами в системе, и, соответственно, определении вида структуры. И, наоборот, к примеру, определить категорию «структура» через совокупность устойчивых отношений между элементами [9]. В любом случае приходим к понятию системность.

На наш взгляд, понятия «системность» и «структурность» тождественны и могут определяться как устойчивость (и/или способность к самовосстановлению) при факторном воздействии на множестве отношений. Данный подход говорит, в том числе, об организованности элементов, т.е. наличии в системе структуры.

Исследование структуры системы является «входным», так как структура определяет ее вид, сложность, позволяет выстроить систему шкалирования и др.

Согласно [10], структурность – это внутренняя расчлененность материального бытия. Сюда включается общая организация элементов, их пространственное расположение, связи между этапами развития. Структура – это прежде всего закономерные связи элементов.

Элементы определяют сам характер связи внутри системы. При этом, качество системы определяется, во-первых, элементами (их природой, свойствами, количеством), во-вторых, структурой, т.е. связью, взаимодействием [11].

В таблице 1 представлена классификация типов связей, используемая в системном анализе [12].

Таблица 1 – Классификация типов связей, используемая в системном анализе

Тип связи	Описание воздействия
Взаимодействия	«Включаются» с момента начала взаимодействия
Функционирование	Обеспечивает реальную жизнедеятельность объекту
Порождение (генетическая связь)	Воздействие между «источником жизни» и «порожденным объектом»
Преобразование	Реализуются через воздействие на окружающую среду, стимулирующее изменения, перестройку отношений
Строение	Структурные связи
Развитие	Реализация возможностей
Управление	Выстраивание «плана» реализации действий

Для исследования межсубъектных связей также интересна классификация систем по видам структурных отношений (рис. 1).

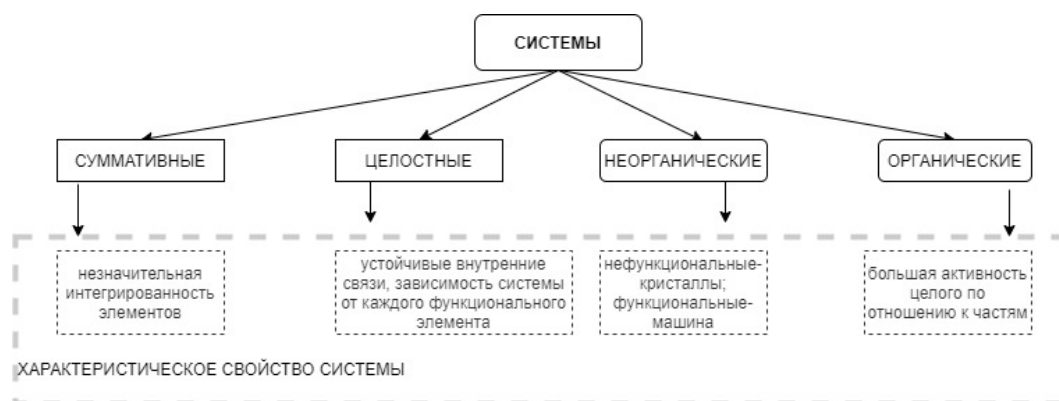


Рисунок 1 – Классификация систем по видам структурных отношений

Дискуссия. С точки зрения представленной классификации, «субъект КИИ – система» может рассматриваться или как суммативная, или как целостная система. Определенность в данном вопросе будет зависеть от уровня взаимодействия между ее элементами (объектами КИИ) и их структурной интегративностью.

Взаимосвязь и взаимовлияние субъектов КИИ объясняется отношениями между сферами деятельности, в которых они функционируют. При этом взаимосвязи на уровне субъекта КИИ возможны в ситуациях взаимодействия субъектов КИИ, функционирующих в одной сфере, или взаимодействия субъектов КИИ, функционирующих в разных сферах.

Воздействие на субъект КИИ в результате реализации угроз ИБ или эксплуатации деструктивных воздействий (деструктов) может быть прямыми или косвенными. Под косвенными воздействиями в данном случае будем понимать последствия и проблемы, возникающие на субъектах КИИ в результате реакции на деструктивное воздействие или угрозу ИБ, реализованных в отношении другого субъекта КИИ.

Эксплуатация деструктов или реализация угрозы ИБ на субъект КИИ влияет на другие субъекты КИИ из-за связей сфер функционирования субъектов КИИ. Например, если транспортная сфера КИИ будет дестабилизирована, то будут затронуты и другие сферы, такие как энергетика, здравоохранение и т.д.

Исследование вопроса поведения субъекта КИИ как системы под воздействием деструктивного воздействия, таким образом, не возможно без исследования существующих в данной системе взаимосвязей.

Для построения формализованной модели межсубъектного взаимодействия на уровне критической информационной инфраструктуры как источника деструктивных воздействий, согласно ФЗ-187 рассмотрим множество отраслевых сфер функционирования субъектов КИИ – SF:

$$SF = \{Z, N, T, S, E, B, Top, Ob_Pr, M_Pr, Rak_Pr, Gor_Pr, Him_Pr\},$$

где Z – сфера здравоохранения, z-субъект КИИ, функционирующий в сфере здравоохранения;

N – сфера науки, n-субъект КИИ, функционирующий в научной сфере;

T – сфера транспорта, t-субъект КИИ, функционирующий в транспортной сфере;

S – сфера связи, s-субъект КИИ, функционирующий в сфере связи;

E – сфера энергетики, e-субъект КИИ, функционирующий в сфере энергетики;

B – банковская сфера и иные сферы финансового рынка, b-субъект КИИ, функционирующий в банковской сфере;

Top – сфера топливно-энергетического комплекса в области атомной энергии, top-субъект КИИ, функционирующий в сфере топливно-энергетического комплекса, в области атомной энергии;

Ob_Pr – сфера оборонной промышленности, ob_pr-субъект КИИ, функционирующий в сфере оборонной промышленности;

Rak_Pr – сфера ракетно-космической промышленности, rak_pr-субъект КИИ, функционирующий в сфере ракетно-космической промышленности;

Gor_Pr – сфера горнодобывающей промышленности, gor_pr-субъект КИИ, функционирующий в сфере горнодобывающей промышленности;

M_Pr – сфера металлургической промышленности, m_pr-субъект КИИ, функционирующий в сфере металлургической промышленности;

Him_Pr – сфера химической промышленности, him_pr-субъект КИИ, функционирующий в сфере химической промышленности.

Множественная модель отношения взаимовлияния и взаимосвязей сфер функционирования субъектов КИИ представлена на рисунке 2.

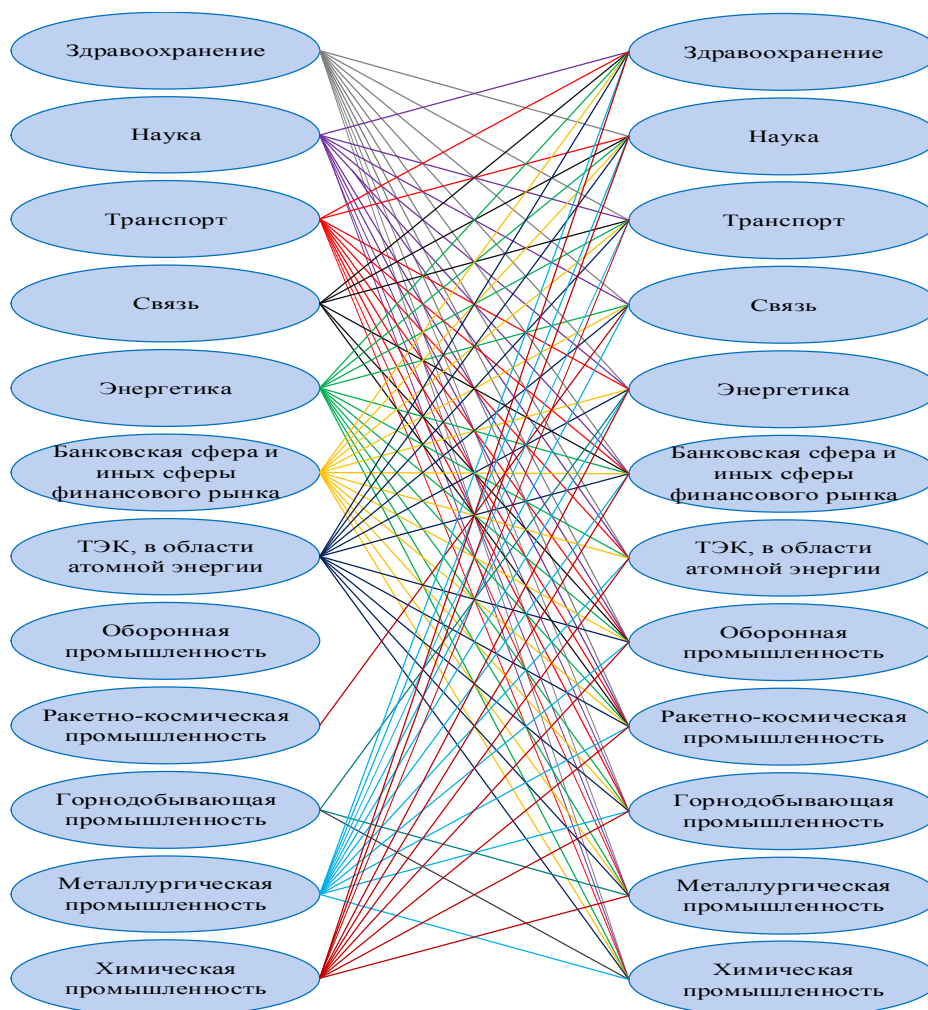


Рисунок 2 – Взаимовлияния сфер функционирования субъектов критической информационной инфраструктуры

Для исследования взаимосвязей и взаимовлияния сфер функционирования КИИ, а, следовательно, предприятий и организаций КИИ, выделим три уровня отношений между субъектами КИИ:

- нейтральная связь между субъектами КИИ. Это отношение между субъектами, при котором изменение состояния одного субъекта не влечет за собой изменения в состоянии другого субъекта;

- прямая связь между субъектами КИИ. Это отношение между субъектами, при котором изменение состояния одного субъекта влечет за собой изменения в состоянии другого субъекта;

- косвенная связь между субъектами КИИ. Это отношение между субъектами, при котором изменение состояния одного субъекта может повлечь за собой изменения в состоянии другого субъекте при выполнении определенного рода условий. Косвенную связь будем также определять как слабовыраженную.

Для экспертной оценки отношений над субъектами КИИ, функционирующими в соответствующих Ф3 187 сферах, введем трехуровневую шкалу, соответствующую обозначенным уровням отношений: 0 – наличие нейтральной связи, 0.5 – наличие косвенной связи, 1 – наличие прямой связи между субъектами КИИ. Результат экспертной оценки представлен в матрице межсубъектных связей в рамках сфер функционирования субъектов КИИ (табл. 2).

С целью анализа видов межсубъектных связей в рамках сфер функционирования КИИ введем обозначения:

$S [SF, i]$ – i -й субъект КИИ, функционирующий в отраслевой сфере из множества SF ,

$\langle SF \rangle$ – элемент множества SF ,

$\langle SF, SF^* \rangle$ – двухэлементный кортеж из множества SF ,

$S[SF, i] \Rightarrow S[SF, j]$ – влияние i -го субъект КИИ, функционирующего в отрасли из множества SF на j -й субъект КИИ, функционирующий в отрасли из множества SF .

Таблица 2 – Матрица межсубъектных связей в рамках сфер функционирования критической информационной инфраструктуры

Сфера	Z	N	T	S	E	B	Top	Ob_Pr	Rak_Pr	Gor_Pr	M_Pr	Him_Pr
Z	1	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
N	0.5	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
T	0	0	1	0.5	0.5	0.5	1	0	0	0.5	0.5	0.5
S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	0.5	0	0.5	1	1	0	0.5	0	0	0	0	0
Top	0.5	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1
Ob_Pr	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
Rak_Pr	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0
Gor_Pr	0	0	0	0	0.5	0	1	0.5	0.5	0.5	1	0.5
M_Pr	0	0	0	0	0	0	1	0.5	0.5	0	0	0
Him_Pr	1	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	1

Таким образом, в результате анализа межсубъектных связей в рамках сфер функционирования КИИ можно говорить о наличии следующих свойств межсубъектного взаимодействия:

$$S[SF, i] \wedge S[SF, j] = \{0\} \vee \{0.5\} \vee \{1\},$$

$$S[SF, i] \wedge S[SF, j] \neq S[SF, j] \wedge S[SF, i],$$

$$S[SF, s] \wedge S[SF, i] = 1$$

$$S[SF, e] \wedge S[SF, i] = 1,$$

$$((S[SF, ob_pr] \wedge S[SF, i]) \wedge (\neg (S[SF, ob_pr] \wedge S[SF, rak_pr]))) \Rightarrow \{0\},$$

$$((S[SF, rak_pr] \wedge S[SF, i]) \wedge (\neg (S[SF, rak_pr] \wedge S[SF, ob_pr]))) \Rightarrow \{0\},$$

$$(S[SF, rak_pr] \wedge S[SF, ob_pr] = \{0.5\}) \wedge (S[SF, ob_pr] \wedge S[SF, rak_pr] = \{0.5\}).$$

По результатам анализа матрицы межсубъектных связей в рамках сфер функционирования критической информационной инфраструктуры в ходе исследования определены следующие классы связей, обладающих общими свойствами:

1. Прямые межсубъектные связи одностороннего типа (сфера-сфера) $a \cdot b = 1, b \cdot a \neq 1$:

$$s^z, s^n, s^t, s^{top}, s^{ob_pr}, s^{rak_pr}, s^{gor_pr}, s^m_pr, s^{him_pr},$$

$$e^z, e^n, e^t, e^{ob_pr}, e^{rak_pr}, e^{gor_pr}, e^m_pr, e^{him_pr},$$

$$top^{ob_pr}, top^{rak_pr}, top^{gor_pr}, top^m_pr, top^{him_pr},$$

$$gor_pr^{top}, gor_pr^m_pr$$

2. Косвенные межсубъектные связи одностороннего типа (сфера-сфера) $a \cdot b = 0.5, b \cdot a \neq 0.5$:

$$n^z, n^e, n^{top}, n^{ob_pr}, n^{rak_pr}, n^{gor_pr}, n^m_pr, n^{him_pr},$$

$$z^{top}, z^{ob_pr}, z^{rak_pr}, z^m_pr, z^{him_pr},$$

$$t^s, t^e, t^{gor_pr}, t^m_pr, t^{him_pr},$$

$$b^z, b^{top},$$

$$top^z$$

$$gor_pr^e, gor_pr^{ob_pr}, gor_pr^{rak_pr}, gor_pr^{him_pr}$$

$$m_pr^{ob_pr}, m_pr^{rak_pr},$$

$$him_pr^{top}, him_pr^{ob_pr}, him_pr^{rak_pr}$$

3. Прямые межсубъектные взаимосвязи (сфера-сфера) $a \cdot b = b \cdot a = 1$:

$$e^s, b^s, b^e, top^e$$

4. Косвенные межсубъектные взаимосвязи (сфера-сфера) $a \cdot b = b \cdot a = 0.5$:

$$b^t, rak_pr^{ob_pr}$$

5. Нейтральные связи между субъектами КИИ (односторонние) (сфера-сфера) $a \cdot b = 0, b \cdot a \neq 0$:

$$z^n, z^s, z^e, z^b, n^s, b^{ob_pr}, b^{rak_pr}, b^{rak_pr}, b^{gor_pr}, b^m_pr, b^{him_pr}$$

$$ob_pr^{sf\ rak_pr}$$

$$rak_pr^{sf\ ob_pr}$$

$$gor_pr^z, gor_pr^n, gor_pr^t, gor_pr^s, gor_pr^b,$$

$$m_pr^z, m_pr^n, m_pr^t, m_pr^s, m_pr^e, m_pr^b, m_pr^{gor_pr}$$

$$him_pr^n, him_pr^t, him_pr^s, him_pr^e, him_pr^b, him_pr^{gor_pr}$$

6. Нейтральная взаимосвязь (сфера-сфера) $a \cdot b = b \cdot a = 0$:

$$t^z, t^n, ob_pr^z, rak_pr^z, n^b$$

7. Прямые межсубъектные взаимосвязи внутри одной сферы ($a \cdot a = 1$):

$$z^z, n^n, t^t, s^s, e^e, him_pr^{him_pr}.$$

Таблица 3 – Классификация межсубъектных отношений в рамках сфер функционирования субъекта КИИ

Класс межсубъектных отношений в рамках сфер функционирования субъекта КИИ	Уровень отношений	Тип отношения	Вид структурной связи	Характеристическое свойство	Логическая модель отношений
Прямая односторонняя межсубъектная связь	Прямая связь	Одностороннее		$(S[SF, i] \wedge S[SF, j] = \{1\}) \wedge (S[SF, j] \wedge S[SF, i] \neq \{1\})$	$s^z, s^n, s^t, s^{top}, s^{ob_pr}, s^{rak_pr}, s^{gor_pr}, s^m_pr, s^{him_pr}, e^z, e^n, e^t, e^{ob_pr}, e^{rak_pr}, e^{gor_pr}, e^m_pr, e^{him_pr}, top^{ob_pr}, top^{rak_pr}, top^{gor_pr}, top^m_pr, top^{him_pr}, gor_pr^{top}, gor_pr^m_pr$
Косвенная односторонняя межсубъектная связь	Косвенная связь			$(S[SF, i] \wedge S[SF, j] = \{0.5\}) \wedge (S[SF, j] \wedge S[SF, i] \neq \{0.5\})$	$n^z, n^e, n^{top}, n^{ob_pr}, n^{rak_pr}, n^{gor_pr}, n^m_pr, n^{him_pr}, z^{top}, z^{ob_pr}, z^{rak_pr}, z^m_pr, z^{him_pr}, t^s, t^e, t^{gor_pr}, t^m_pr, t^{him_pr}, b^z, b^{top}, top^z, gor_pr^e, gor_pr^{ob_pr}, gor_pr^{rak_pr}, gor_pr^{him_pr}, m_pr^{ob_pr}, m_pr^{rak_pr}, him_pr^{top}, him_pr^{ob_pr}, him_pr^{rak_pr}$
Прямая межсубъектная взаимосвязь	Прямая связь	Взаимосвязь	Межотраслевая	$S[SF, i] \wedge S[SF, j] = S[SF, j] \wedge S[SF, i] = \{1\}$	e^s, b^s, b^e, top^e
Косвенная межсубъектная взаимосвязь	Косвенная связь			$S[SF, i] \wedge S[SF, j] = S[SF, j] \wedge S[SF, i] = \{0.5\}$	$b^t, rak_pr^{ob_pr}$
Односторонняя нейтральная связь	Нейтральная связь	Одностороннее		$(S[SF, i] \wedge S[SF, j] = \{0\}) \wedge (S[SF, j] \wedge S[SF, i] \neq \{0\})$	$z^n, z^s, z^e, z^b, n^s, b^{ob_pr}, b^{rak_pr}, b^{rak_pr}, b^{gor_pr}, b^m_pr, b^{him_pr}, ob_pr^{sf\ rak_pr}, rak_pr^{sf\ ob_pr}, gor_pr^z, gor_pr^n, gor_pr^t, gor_pr^s, gor_pr^b, m_pr^z, m_pr^n, m_pr^t, m_pr^s, m_pr^e, m_pr^b, m_pr^{gor_pr}, him_pr^n, him_pr^t, him_pr^s, him_pr^e, him_pr^b, him_pr^{gor_pr}$
Нейтральная взаимосвязь	Нейтральная связь	Взаимосвязь		$S[SF, i] \wedge S[SF, j] = S[SF, j] \wedge S[SF, i] = \{0\}$	$t^z, t^n, ob_pr^z, rak_pr^z, n^b$
Прямая межсубъектная взаимосвязь	Прямая связь			$S[SF, i] \wedge S[SF, i] = \{1\}$	$z^z, n^n, t^t, s^s, e^e, him_pr^{him_pr}$
Нейтральная межсубъектная связь	Нейтральная связь	Самосвязь	Внутриотраслевая	$S[SF, i] \wedge S[SF, i] = \{0\}$	$b^b, top^{top}, ob_pr^{ob_pr}, rak_pr^{rak_pr}, m_pr^m_pr$
Косвенная межсубъектная связь	Косвенная			$S[SF, i] \wedge S[SF, i] = \{0.5\}$	$gor_pr^{gor_pr}$

1. Межсубъектные нейтральные связи внутри одной сфера ($a \cdot a = 0$)
 $b \wedge b, top \wedge top, ob_pr \wedge ob_pr, rak_pr \wedge rak_pr, m_pr \wedge m_pr$
2. Межсубъектные косвенные взаимосвязи внутри одной сфера ($a \cdot a = 0.5$):
 $gor_pr \wedge gor_pr$.

Таким образом, можно представить классификацию отношений между субъектами КИИ (табл. 2, рис. 3).

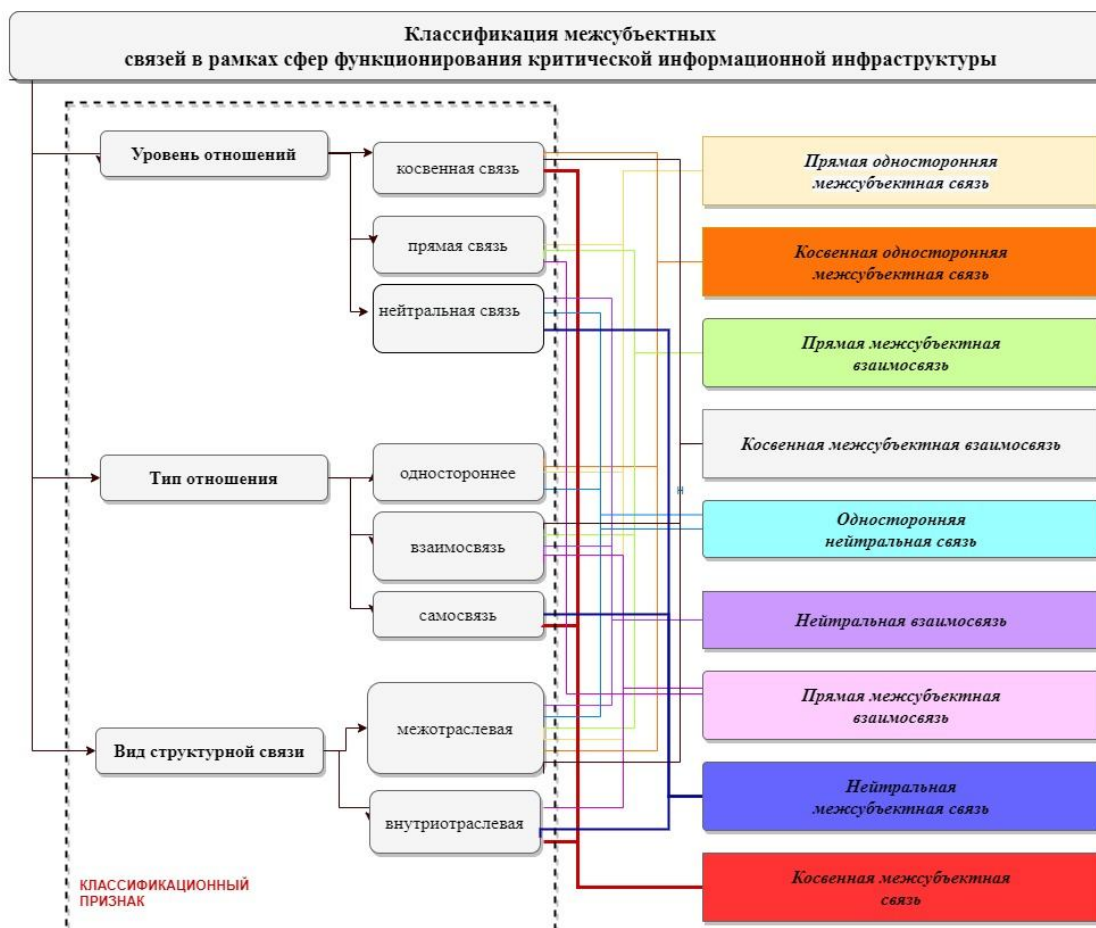


Рисунок 3 – Классификация межсубъектных связей в рамках сфер функционирования критической информационной инфраструктуры

Заключение. Представленные результаты методологического исследования позволяют говорить о существовании взаимосвязей и взаимовлияния сфер функционирования субъектов КИИ, что подчеркивает необходимость их учета в оценке и повышении безопасности субъектов КИИ для поддержания безопасности жизнедеятельности общества и государства.

Библиографический список

1. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 30.03.2021).
2. Максимова Е. А. Исследование алгоритмов безопасной передачи данных между объектами критической информационной инфраструктуры / Е. А. Максимова // «Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации» (ИНФОБЕЗОПАСНОСТЬ – 2019) : сборник докладов XXIII пленума ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции. – 2019. – С. 157–163.
3. Максимова Е. А. Оценка информационной безопасности субъекта критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях : монография / Е. А. Максимова. – Волгоград : Издательство ВолГУ, 2020. – 95 с.
4. Максимова Е. А. Современные технологии и информационные войны / Е. А. Максимова, В. В. Баранов, Г. Н. Чурилин // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность» : сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции / Федеральное

государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА». – Анапа, 2020. – С. 137–147.

5. Максимова Е. А. Модель оценки рисков при расследовании компьютерных преступлений / Е. А. Максимова, В. В. Баранов, В. П. Зязин // Вестник УрФО: Безопасность в информационной сфере. – 2018. – № 4 (30). – С. 38–42.

6. Баранов В. В. Анализ модели информационного обеспечения процессов и систем при реализации многоагентного интеллектуального взаимодействия / В. В. Баранов, Е. А. Максимова, О. С. Лаута // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 4. – С. 32–41.

7. Баранов В. В. Робототехническая система анализа кибербезопасности информационных систем и сетей связи / В. В. Баранов, Е. А. Максимова, В. М. Московченко, О. С. Лаута // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции. – 2019. – С. 1501–1507.

8. Большая советская энциклопедия. – Режим доступа: <https://gufo.me/dict/bse/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 30.03.2021).

9. Национальная философская энциклопедия. – Режим доступа: СТРУКТУРА это (terme.ru), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 10.04.2021).

10. Коробко В. И. Философские категории развития в теории управления / В. И. Коробко, Н. Л. Карданская, М. Ю. Матвеев // Инновации в отраслях народного хозяйства как фактор решения социально-экономических проблем современности : сборник докладов и материалов IV Международной научно-практической конференции. – Москва : Издательство Московского гуманитарного университета, 2014. – С. 8–14.

11. Алексеев П. В. Философия : учебник / П. В. Алексеев, А. В. Панин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : «Проспект», 1997. – 381 с. – Режим доступа: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова ФИЛОСОФСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ П. В. Алексеев, А. В. Панин ФИЛОСОФИЯ УЧЕБНИК Издание второе, переработанное и дополненное •ПРОСПЕКТ. (libed.ru), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 05.04.2021).

12. Социальная диагностика. – Режим доступа: Типы связей, которые есть в системном анализе. (poisk-ru.ru), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 10.04.2021).

References

1. *Federalny zakon «O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii» ot 26.07.2017 N 187-FZ* [Federal Law "On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" of 26.07.2017 N 187-FZ]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (accessed 30.03.2021).

2. Maksimova E. A. Issledovaniye algoritmov bezopasnoy peredachi dannykh mezhdu ob"yektami kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Investigation of algorithms for secure data transmission between critical information infrastructure objects]. *Fundamentalnyye problemy informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh tsifrovoy transformatsii* (INFOBEZOPASNOST' – 2019) : sbornik dokladov XXIII plenuma FUMO VO IB i Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii [Fundamental problems of information security in the context of digital transformation : collection of reports of the XXIII Plenum of the FUMO VO IB and the All-Russian Scientific conference (INFOSECURITY – 2019)], 2019, pp. 157–163.

3. Maksimova E. A. *Otsenka informatsionnoy bezopasnosti subyekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury pri destruktivnykh vozdeystviyakh : monografiya* [Assessment of information security of the subject of critical information infrastructure under destructive influences : monograph]. Volgograd, Publishing house of the Volgograd State University, 2020. 95 p.

4. Maksimova E. A., Baranov V. V., Churilin G. N. *Sovremennyye tekhnologii i informatsionnyye voyny* [Modern technologies and information wars]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Informatsionnaya bezopasnost'»* : sbornik statey II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [The state and prospects of development of modern science in the field of "Information security" : collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference]. Anapa, 2020. pp. 137–147.

5. Maksimova E. A., Baranov V. V., Zyazin V. P. Model otsenki riskov pri rassledovanii kompyuternykh prestupleniy [Risk assessment model in the investigation of computer crimes]. *Vestnik UrFO. Bezopasnost v informatsionnoy sfere* [Bulletin of the Ural Federal District. Security in the information sphere], 2018, no. 4 (30), pp. 38–42.

6. Baranov V. V., Maksimova E. A., Lauta O. S. *Analiz modeli informatsionnogo obespecheniya protsessov i sistem pri realizatsii mnogoagentnogo intellektualnogo vzaimodeystviya* [Analysis of the model of information support of processes and systems in the implementation of multi-agent intellectual interaction]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol, diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2019, no. 4, pp. 32–41.

7. Baranov V. V., Maksimova E. A., Moskovchenko V. M., Lauta O. *Robototekhnicheskaya sistema analiza kiberbezopasnosti informatsionnykh sistem i setey svyazi* [Robototechnical system for analyzing cybersecurity of information systems and communication networks]. *Aktualnyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki : sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics : proceedings of the International Scientific Conference], 2019, pp. 1501–1507.

8. *Bolshaya sovetskaya entsiklopediya* [The Great Soviet Encyclopedia]. Available at: <https://gufo.me/dict/bse/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0> (accessed 30.03.2021).

9. *Natsionalnaya filosofskaya entsiklopediya* [National Philosophical Encyclopedia]. Available at: THE STRUCTURE is (terme.ru) (accessed 10.04.2021).

10. Korobko V. I., Kardanskaya N. L., Matveev M. Yu. *Filosofskiye kategorii razvitiya v teorii upravleniya* [Philosophical categories of development in the theory of management]. *Innovatsii v otraslyakh narodnogo khozyaystva, kak faktor resheniya sotsialno-ekonomicheskikh problem sovremennosti : sbornik dokladov i materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving the socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Moscow, Publishing house of Moscow University for the Humanities, 2014, pp. 8–14.

11. Alekseev P. V., Panin A. V. *Filosofiya : uchebnik*. [Philosophy : textbook]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow, Prospect Publ., 1997. 381 p. Available at: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet im. M. V. Lomonosova FILOSOFSKIY FAKULTET P. V. Alekseyev, A. V. Panin FILOSOFIYA UCHEBNIK Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye •PROSPEKT [Lomonosov Moscow State University FACULTY OF Philosophy P. V. Alekseev, A.V. Panin PHILOSOPHY TEXTBOOK Second edition, revised and supplemented * PROSPECT] (libed.ru) (accessed 05.04.2021).

12. *Sotsialnaya diagnostika* [Social diagnostics]. Available at: Tipy svyazey, kotoryye yest v sistemnom analize (poisk-ru.ru) [The types of links that are present in the system analysis] (accessed 10.04.2021).

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.081-089
УДК 004[01+9.2]

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПЕЧАТНОГО ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ И ВЕРИФИКАЦИЕЙ ДОКУМЕНТОВ

Статья поступила в редакцию 26.04.2021, в окончательном варианте – 16.05.2021.

Петров Дмитрий Никифорович, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 24-26/49 литер А,
кандидат технических наук, ORCID 0000-0003-0083-784X, e-mail: petrov.dmitry@technolog.edu.ru

Луцко Андрей Николаевич, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 24-26/49 литер А,
кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-5350-1595, e-mail: lutsko@technolog.edu.ru

Рассмотрена и проанализирована проблематика электронно-печатного делопроизводства, идентификации и верификации документов. Обоснована техническая целесообразность применения алгоритмов распознавания рукописного текста, искусственного интеллекта и криптографии при электронно-печатном делопроизводстве. Предложен способ автоматизированной обработки документа на бумажном носителе и проверки на подлинность его электронного аналога. Подробно изложен алгоритм альтернативного четырехстадийного жизненного цикла документа и методика его верификации при сокращении ручных операций и машинном вводе. Представлена структура интегрированной подсистемы машинного ввода и верификации документов, используемая в рамках Единой информационной системы «Электронный Университет» образовательного учреждения. Получены результаты автоматизированной обработки и защиты документа с обучением многослойной сверточной нейронной сети на примере ведомостей промежуточной аттестации. Доказана возможность применения изложенной методики к документам строгой отчетности фиксированной структуры с рукописным заполнением.

Ключевые слова: электронно-печатный документооборот, идентификация, верификация, распознавание образов, нейронная сеть

AUTOMATION OF ELECTRONIC-PRINTING OFFICE WORK WITH THE DOCUMENTS IDENTIFICATION AND VERIFICATION

The article was received by the editorial board on 26.04.2021, in the final version – 16.05.2021.

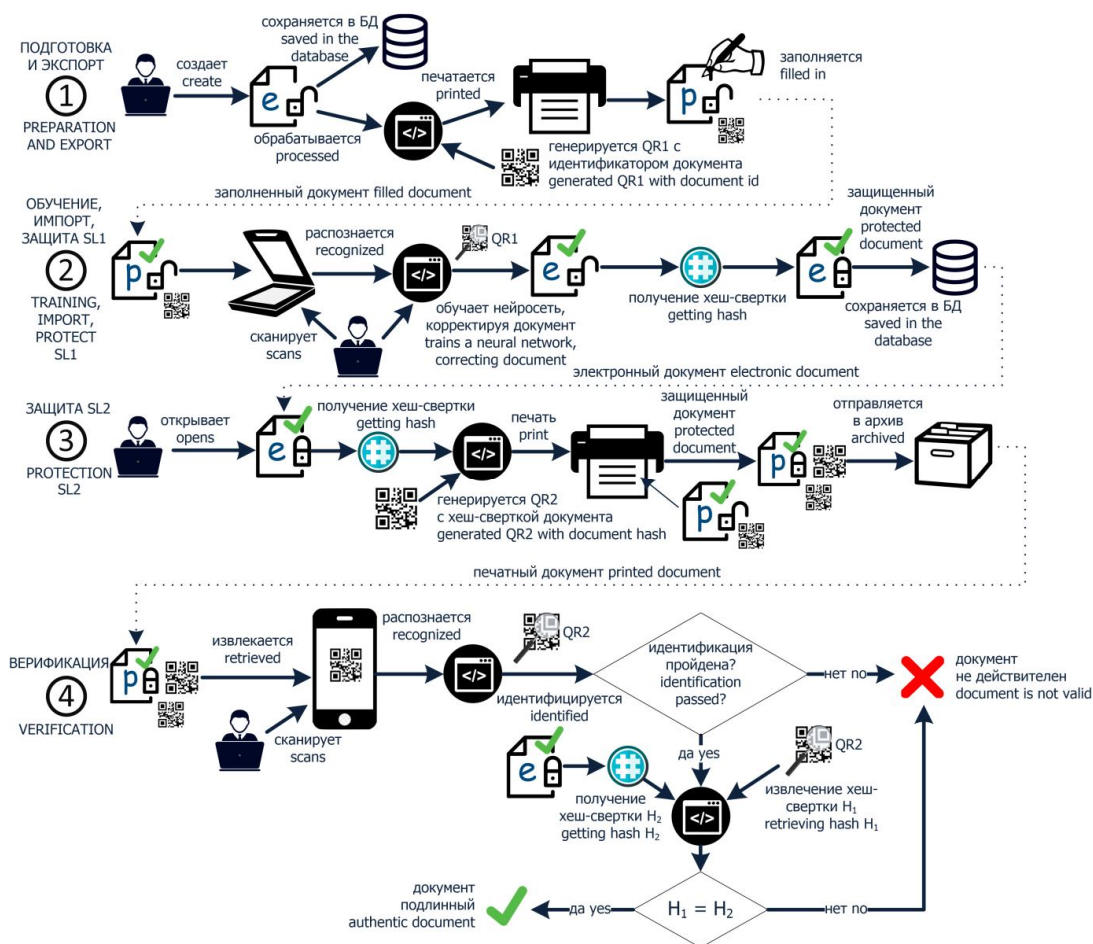
Petrov Dmitriy N., Saint-Petersburg State Institute of Technology (technical university), 24-26/49 lit A Moskovskiy Ave., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), ORCID 0000-0003-0083-784X, e-mail: petrov.dmitry@technolog.edu.ru

Lutsko Andrey N., Saint-Petersburg State Institute of Technology (technical university), 24-26/49 lit A Moskovskiy Ave., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0001-5350-1595, e-mail: lutsko@technolog.edu.ru

In the article the problem of electronic-printing office work, the documents identification and verification has been reviewed and analyzed. The technical feasibility of using algorithms for handwriting recognition, artificial intelligence and cryptography in electronic-printing office work has been substantiated. Authors are suggest an automated processing method of a paper document verification of its electronic counterpart authenticity. The algorithm of the alternative four-stage life cycle of the document and the method of its verification with the manual operations reduction and machine input are presented in detail. The structure of the integrated subsystem of machine input and documents verification used in the Edinaja informacionnaja sistema «Elektronnyy Universitet» of an educational institution is presented. The results of the document automated processing and protection with training a multilayer convolutional neural network using the example of intermediate certification sheets were obtained. The possibility of applying the described methodology to strict reporting of a fixed structure documents with handwritten filling has been proved.

Keywords: electronic-printing office work, identification, verification, pattern recognition, neural network

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. С начала XXI столетия стремительно развивается тренд электронного делопроизводства. С ростом объемов данных и ужесточением требований к скорости, доступности и качеству их обработки, традиционный бумажный документооборот признан неэффективным. Однако не стоит отрицать чрезвычайную устойчивость бумажных и подобных им носителей к самым негативным воздействиям природы или человека. Действительно, выражение «рукописи не горят» имеет под собой физическую основу. Работа с бумажными документами не требует специальных устройств чтения, а время жизни базовой лингво-знаковой системы составляет тысячи лет. Электронные данные утрачивают читаемость не только вследствие экстремального физического воздействия на их носители, но и из-за их относительно короткого срока службы. Кроме того, время жизненного цикла компьютерных баз данных (БД) ограничено перманентным развитием технологий энергонезависимых запоминающих устройств с отказом от устаревших технологий, что также препятствует прочтению архивных данных, не приведенных к новому стандарту и формату записи. Данные на электронных носителях также подвержены искажению вследствие системных сбоев, вирусных атак.

Благодаря преимуществам, достигаемым при электронном документообороте, и преимуществам при использовании бумажных носителей, электронно-печатный способ делопроизводства, принятый большинством предприятий, будет использоваться еще достаточно продолжительное время. Это время продлевают финансовые, технические и организационные сложности использования и обслуживания дорогостоящих сертифицированных информационных систем повышенной надежности и средств безопасности данных, а также высокая стоимость бланков документов с технологической, физико-химической или полиграфической защитой [1].

Наиболее часто используемой поэтапной схемой электронно-печатного документооборота является формирование бланка электронного документа, его печать с последующим рукописным заполнением, ручной ввод данных в БД с заполненного бланка, сканирование бумажной версии документа и сопряжение ее с электронной версией, архивирование.

Поэтому актуальной является задача повышения скорости и качества ввода (оцифровки) рукописных данных с наложением защиты на электронную и печатную версии документа, что приводит их к жесткому соответствию и неподдельности.

Постановка задачи и аналитический обзор. Для электронно-печатного делопроизводства с фиксированной структурой бланка печатного документа сформулируем постановку задачи: разработать механизм идентификации, автоматизированного ввода рукописных данных и верификации соответствия электронного документа печатному аналогу с минимизацией стоимости программно-аппаратных средств, использованием универсальных расходных материалов, сокращением ручных операций и времени обработки при сохранении конфиденциальности данных.

Для решения поставленной задачи требуется использование интеллектуальных алгоритмов в области распознавания рукописного текста [2, 3], применение машиночитаемого формата представления данных [4], хеш-функции, удовлетворяющей современным условиям криптостойкости. Одним из вариантов исполнения проекта является интеграция внешнего сервиса, оказывающего услуги по защите и сертификации документов [5]. В задачах идентификации личности ведутся разработки высокоэффективных программно-аппаратных комплексов [6], основные технические идеи которых могут быть применимы для защиты документов менее высокого ранга. В качестве базового механизма защиты документа может быть хеширование графических фрагментов документа с применением специальных аппаратных средств [7, 8].

Обследование технических показателей аппаратного обеспечения учебного заведения показало сложность их применения для наложения контрольных изображений, микротекстов, водяных знаков и других артефактов для последующего их сканирования и анализа. Внешние удостоверяющие сервисы рекомендуется использовать только для документов, данные в которых не являются конфиденциальными.

С учетом выявленных технико-экономических ограничений, целесообразны использование системы хранения данных учебного заведения и разработка собственной автономной подсистемы машинного ввода и верификации документов с ее интеграцией в действующую Единую информационную систему «Электронный Университет» [9].

При выборе средств защиты электронных и печатных документов следует учитывать строгость документа, его конфиденциальность и стоимость утраты. Соблюдая баланс между затратами на разработку и обслуживание информационной системы и ее достаточной для определенных видов документов и персонала эффективностью функционала, можно добиться наилучшего технико-экономических показателей делопроизводства.

Описание используемых технологий и алгоритмов. В соответствии с поставленной задачей определен механизм машинной идентификации и верификации электронных и печатных документов. Отработка технологий и алгоритмов распознавания и проверки идентичности документов проводилась на образцах экзаменационных и зачетных ведомостей промежуточной аттестации. Подобные ведомости в сессию тиражируются сотнями экземпляров и служат основой для юридической фиксации результатов образовательного процесса в вузе. В качестве машиночитаемого формата выбран матричный двумерный код быстрого реагирования (Quick Response код) или QR-код, изобретенный японской машиностроительной корпорацией Denso-Wave для автоматизации идентификации объектов, на которых он наносится. Преимущества, достигаемые при использовании данной машиночитаемой оптической метки: высокая плотность кодируемой информации на единицу площади, легкое распознавание сканируемым оборудованием, встраивание контрольной суммы в данные препятствующей искажению распознавания. Данные могут быть или прочитаны полностью и точно или не прочитаны вовсе. Среди популярных алгоритмов хеширования данных для подготовки хеш-свертки документа выбран MD5 с наложением случайных блоков данных (соли) по определенному алгоритму, что усложняет криптоанализ и повышает криптостойкость при атаке перебором по словарю (brute force attack). При генерации документа перед выводом его на печать в БД вносится соответствующая документу JSON-структура: {"id": "идентификатор", "hash": "хеш-свертка"}. JSON – минимально нагруженный формат для представления и извлечения данных, имеющий библиотеки для различных языков программирования. Идентификатор используется для нахождения в БД электронного документа, соответствующего сканируемому, хеш-свертка используется для подтверждения подлинности электронного документа. При формировании бланка документа рассчитывается хеш-свертка от метаданных документа. При защите документа и его закрытии, хеш-свертка рассчитывается от метаданных и введенных в результате распознавания и коррекции данных документа.

Заполненный документ передается на устройство видео ввода в режиме черно-белого сканирования. В результате сканирования ненормализованная скан-копия документа (рис. 1) поступает на обработку в подсистему машинного ввода и верификации документов.

СПбГТИ(ТУ) Факультет информационных технологий и управления
Экзаменационная ведомость

Группа 411 Курс 1 Семестр 1
ФИО преподавателя Пантелеев Владимир Александрович
Название дисциплины Инженерная и компьютерная графика

№ п/п	ФИО студента	№ зачетной книжки	№ билета	оценка	подпись
1	Абанин Даниил Вадимович	201124	12	5 4.1	<i>de</i>
2	Власов Руслан Вадимович	200388	4	4 4.2	<i>de</i>
3	Григорьева Анастасия Анатольевна	200389	8	4 ...	<i>de</i>
4	Еремов Дмитрий Юрьевич	200390	5	3	<i>de</i>
5	Липкин Всеволод Федорович	200391	14	4	<i>de</i>
6	Лосев Анатолий Сергеевич	200392	2	3	<i>de</i>
7	Пронин Артём Андреевич	201125	10	5	<i>de</i>
8	Ситникова Елизавета Юрьевна	200270	7	5	<i>de</i>
9	Фролова Кристина Денисовна	200398	1	4	<i>de</i>
10	Щукин Алексей Сергеевич	200399	3	4 4.10	<i>de</i>

Итого 10; из них: отлично 3, хорошо 5, удовлетворительно 2,
не удовлетворительно 0, не явилось 0.

Дата экзамена: 27 января 2021 года

Декан *de* А. А. Иванов

Преподаватель *de*

5 



Рисунок 1 – Ненормализованная скан-копия заполненного документа

На рисунке 1 красным отмечены 1 и 2 – видеометки позиционирования области распознавания, 3 – колонка таблицы для ручного ввода, 4,1, 4,2,...,4,10 – общие области для распознавания, 5 – область QR-кода. Отслеживаемые и корректируемые дефекты скан-копии: перекося, не превышающий 15 и разворот.

Нормализация полученной скан-копии документа производится по следующему алгоритму:

– проверка на разворот по отсутствию в области 4 QR-кода. При обнаружении разворота, изображение поворачивается на 180°.

– коррекция перекося при анализе координат видеометок. Рассчитывается угол коррекции по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}\right),$$

где x_1, y_1 – новые координаты видеометки 1; x'_1, y'_1 – исходные координаты видеометки 1. x_2, y_2 – координаты видеометки 2. Учитывая, что при выравнивании изображения $x_1 = x_2$, а $y_1 \sim y'_1$, то формула принимает вид:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\sqrt{(x_2 - x'_1)^2}}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2}}\right).$$

Направление поворота изображения определяется при сравнении x_2 с x'_1 .

Отмечено, что выравнивание изображения эффективнее в случае наибольшей корреляции α от длины прилегающего катета. Этого можно добиться только при наибольшем расстоянии между метками 1 и 2 (рис. 2).

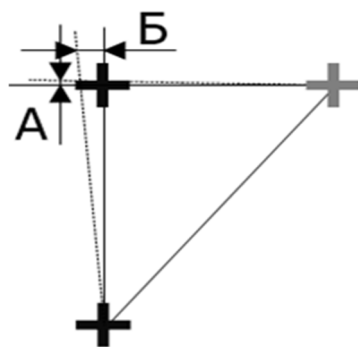


Рисунок 2 – Эффективное расположение видеометок (слева) и альтернативная видеометка (справа)

Расстояние $B > A$. Горизонтальное расположение видеометок эффективнее вертикального при портретной ориентации документа. При альбомной ориентации – наоборот.

Для поиска в общих областях распознавания 4.1, 4.2, ..., 4.10 (рис. 1) частных зон распознавания по пикселям черного цвета рукописного текста используется упрощенный метод роя частиц, показавший лучшую в сравнении с простым линейным обходом производительность (рис. 3).

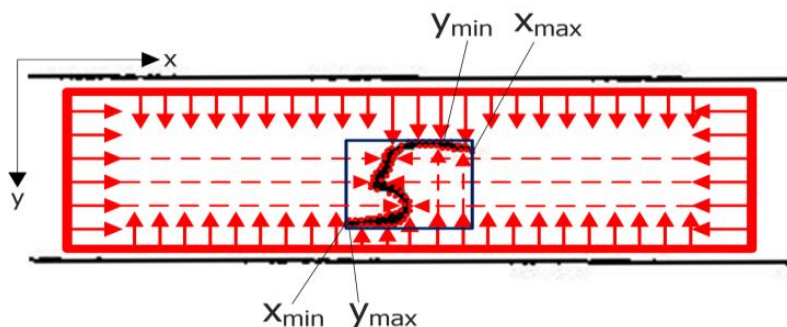


Рисунок 3 – Графическая интерпретация алгоритма поиска частной области распознавания

На рисунке 3 внешняя область – общая, внутренняя область – частная.

Производится кадрирование изображения до области, покрывающей текст для распознавания, по наименьшей и наибольшей координатам x и y из всех «осевших» на граничных пикселях черного цвета частиц.

Наиболее сложным с точки зрения реализации и настройки является механизм распознавания рукописного текста. Используется многослойная сверточная нейронная сеть, предложенная Яном Лекуном и ориентированная на эффективное распознавание образов [10]. В качестве кибернетической модели мозга используется перцептрон Розенблатта. При исследовании структуры нейросети и адаптации функций активации получено решение на базе четырех слоев – входного, двух скрытых и выходного (рис. 4).

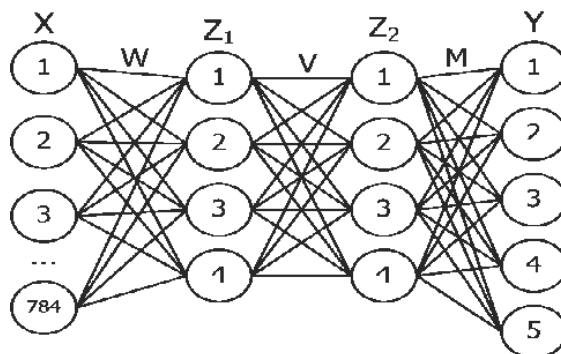


Рисунок 4 – Структура четырехслойной нейросети

На рисунке 4 X – входной слой, Z_1 и Z_2 – скрытые слои, Y – выходной слой, W , V , M – ступенчатые функции активации.

Четырехслойная нейросеть испытывалась на примере электронно-печатной экзаменационной ведомости (рис. 1). Количество входов для каждого слоя, количество слоев, алгоритмы ступенчатых функций активации W , V , M и весовые коэффициенты для каждой из них определены экспериментально.

Входами X являются пиксели масштабированной до разрешения 28x28 пикселей частной области распознавания.

Для каждого из нейронов входного слоя по координатам пикселя определена матрица весовых коэффициентов (0 или 1) по каждой из оценки (от 1 до 5). Вычисление общего веса по каждой оценке производится по цвету пикселя (рис. 5) по количеству его совпадения с эталонным по соответствующим координатам.

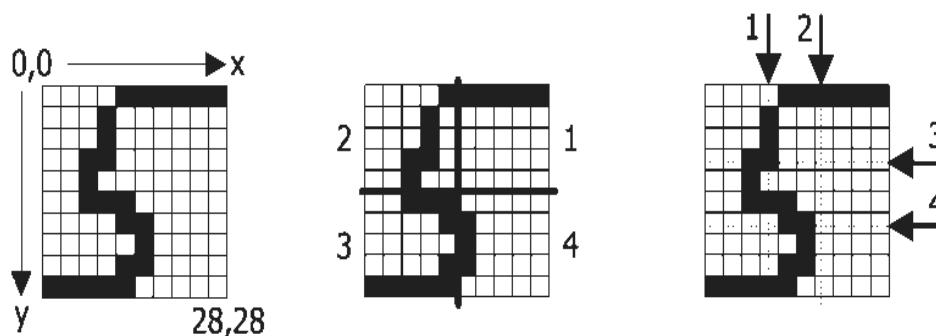


Рисунок 5 – Описание функций активации для каждого из слоев

На слое Z_1 с каждым из четырех нейронов связана структура, состоящая из четырех целых чисел (количество черных пикселей в каждом квадранте) и соответствующая им оценка. Вычисление общего веса по каждой оценке производится умножением на процент соответствия фактического количества пикселей с эталонным, установленным при обучении.

На слое Z_2 функция активации M сравнивает количество переходов белый-черный пиксель на каждом из четырех указанных направлений с эталонным количеством, установленным при обучении для каждой оценки. Общий вес складывается из процентов соответствия фактического количества переходов с эталонным.

На выходе каждый из нейронов, соответствующий оценке от 1 до 5, получает суммарный вес по нормализованной шкале от 0 до 100. Настройка доверительного порога для каждого из нейронов обеспечивает минимальную ошибку. Например, для оценки 5 установлен доверительный порог = 95. Для оценки 4 порог составляет 75. При суммарных значениях веса меньше пороговых для всех нейронов слоя Y считается отметка н/я (не явка).

Схема электронно-печатного документооборота. На рисунке 6 представлена общая схема предлагаемого электронно-печатного документооборота.

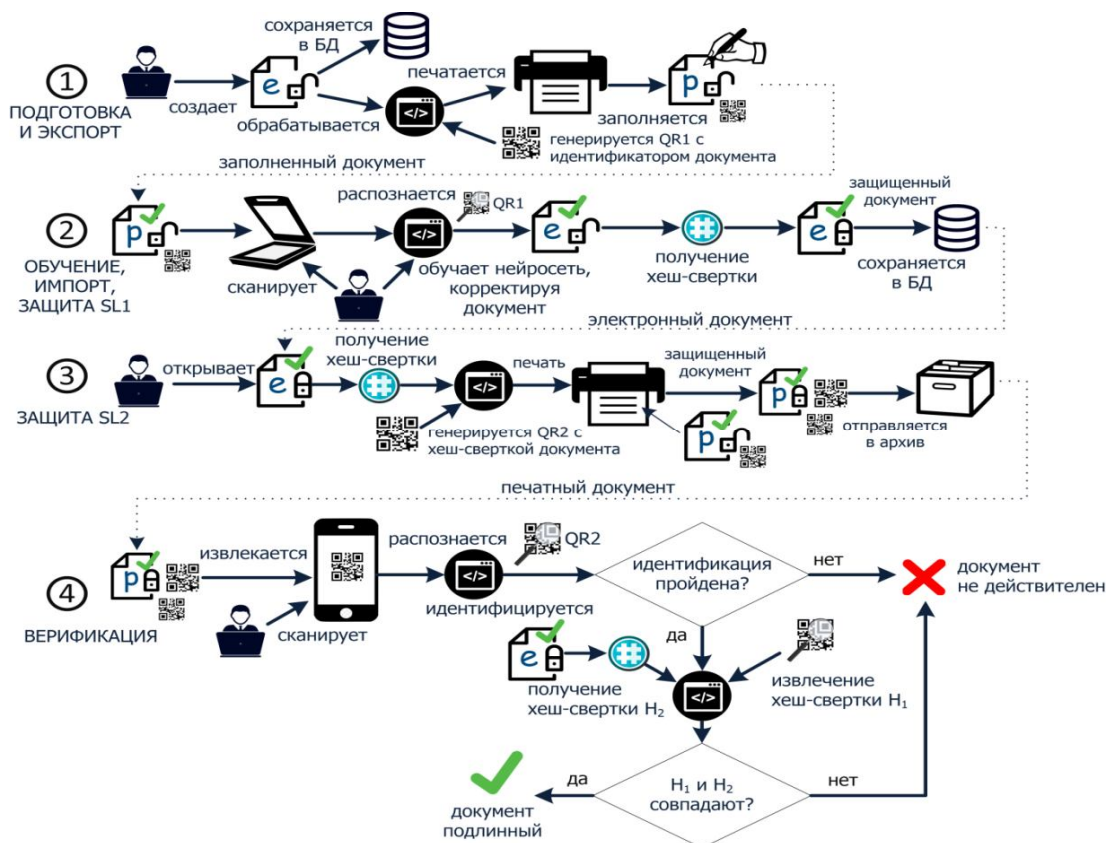


Рисунок 6 – Схема электронно-печатного документооборота

Жизненный цикл документа разбивается на 4 стадии: подготовка и печать, импорт с защитой SL1, наложение дополнительной защиты SL2 и верификация по SL2. SL1 – защита данных электронного документа, SL2 – защита от утраты соответствия электронного документа документу на бумажном носителе.

В стадии подготовки и печати для электронного документа формируется идентифицирующий QR-код (QR1) с электронным идентификатором документа и хеш-сверткой от метаданных документа. Подготовленный бланк с метаданными документа отправляется на печать для дальнейшего ручного заполнения.

В стадии импорта документа заполненный бланк сканируется, открывается изображением для визуального анализа и корректировки данных. После корректировки и сохранения данных, производится потоковое обучение нейросети с закрытием документа расчетом для него хеш-свертки от метаданных и сохраненных данных. После этого бумажный экземпляр документа может быть помещен в архив, если принято решение не накладывать на него защиту SL2.

В стадии наложения защиты SL2 генерируется верифицирующий QR-код (QR2) в виде ссылки для GET-посылки:

`https://адрес_веб-сервиса?id=идентификатор_документа&hash=хеш_свертка.`

Верифицирующий QR-код печатается на обратной (пустой) стороне документа. Документ помещается в архив.

Впоследствии, на стадии 4, при необходимости, документ извлекается из архива. На устройстве, сканирующем QR2, открывается веб-ссылка с отображением электронного экземпляра документа, данными о его подлинности и соответствии печатному аналогу.

На рисунке 7 изображена функциональная структура подсистемы машинного ввода и верификации документов ЕИС «Электронный Университет».

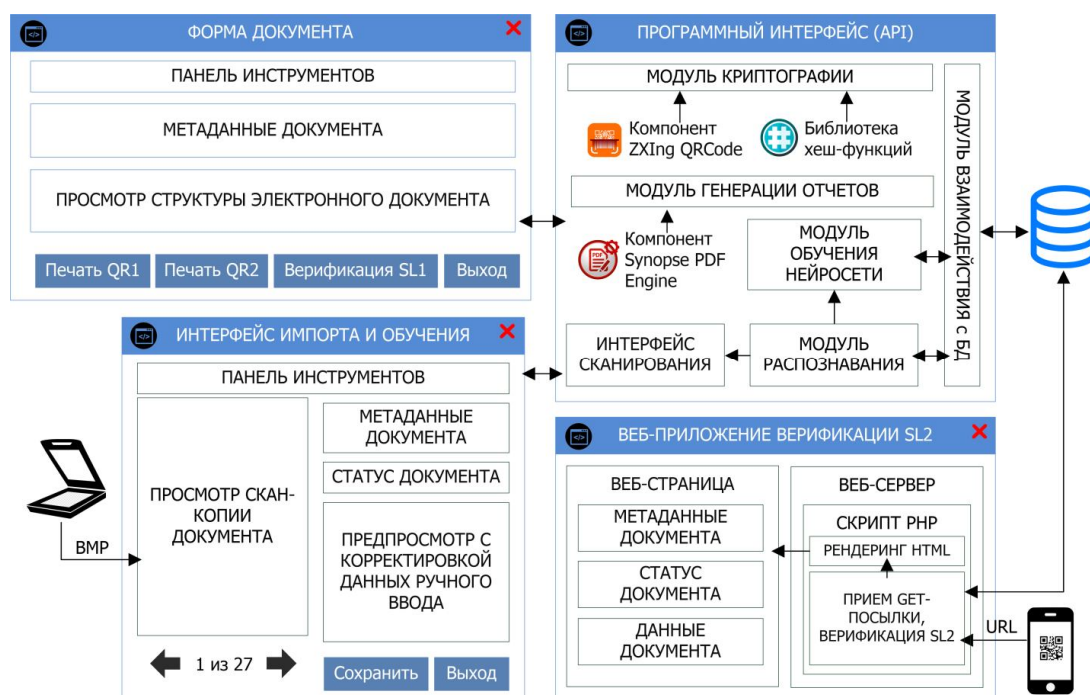


Рисунок 7 – Функциональная структура подсистемы машинного ввода и верификации документов

Графический интерфейс пользователя включает Форму документа, Интерфейс импорта и обучения и Веб-приложение верификации SL2.

Форма документа используется для подготовки и печати бланка документа с QR1 для ручного заполнения, а также для вывода на печать QR2 после ввода в электронный документ рукописных данных. Форма документа используется также для проверки подлинности электронного аналога документа (Верификация SL1).

Интерфейс импорта и обучения позволяет сканировать заполненный документ на печатном носителе, отобразить его метаданные, статус и распознанные данные ручного ввода с возможностью их корректировки. После сохранения документа выполняется ввод данных документа в БД с одновременным обучением нейросети (корректировка сохраняемых в БД весовых коэффициентов по каждому из слоев). Обучение является наиболее длительным процессом, время которого зависит от объема обрабатываемых рукописных данных.

Для ускорения обучения нейросети рассматривался вариант использования сторонней базы данных образцов рукописного написания цифр MNIST, но в итоге выбран вариант обучения нейросети на почерке работников вуза, что представляет большой научный интерес.

Веб-приложение верификации SL2 используется для приема запроса в виде URL от мобильного устройства, сканирующего QR2. При обращении к БД по идентификатору документа извлекаются метаданные и данные документа для расчета хеш-свертки, сравниваемой с полученной в URL. При равенстве хеш-сверток электронный документ получает статус «подлинный». При неравенстве хеш-сверток документ считается «не действительным». При переходе по URL открывается веб-страница с метаданными и данными документа с отображением его статуса. Веб-страница используется для визуального сравнения и анализа данных «не действительного» электронного документа.

В программном интерфейсе подсистемы машинного ввода и верификации документа используются компоненты для генерации и распознавания штрих-кодов «ZXing QRCode», библиотека с реализацией алгоритмов хеш-функций, в том числе MD5, компонент для рендеринга и вывода документов формата PDF Synopse «PDF Engine», модуль с реализацией алгоритма обучения нейросети с модулем распознавания рукописного текста. Интерфейс сканирования служит «обвязкой» между графическим Интерфейсом импорта и обучения и программным интерфейсом. Его назначение – обращение к выбранному пользователем сканирующему устройству по стандартному протоколу TWAIN с захватом изображения и передачей его для просмотра в компонент TImage Интерфейса импорта и обучения.

Заключение. Таким образом, предложенная методика и ее практическая реализация позволяют без существенного изменения традиционного документооборота выстроить единую систему электронно-печатного делопроизводства организации. При этом время формирования электронного документа из его печатного аналога сокращается в среднем в три раза. Обеспечивается достаточный уровень защищенности электронных документов и их оперативная верификация по аналогам на бумажном носителе.

Заложенные в систему функции самообучения, а также автоматической маркировки подлинности их электронных аналогов, не требуют проведения дополнительных организационных мероприятий, применения специального оборудования и специфических бумажных носителей.

Используемая технология автоматизированного перевода документов на бумажных носителях в электронный вид обладает известной гибкостью. В зависимости от важности документа и от поставленных задач изменяется, например, степень его защиты с SL2 на SL1.

В перспективе планируется создание отдельного сервиса приложений с API для распознавания рукописного текста на базе Python, библиотеки Keras и высокопроизводительной векторной СУБД.

Тестирование полученного программного решения доказало его применимость для многотиражных документов строгой отчетности фиксированной структуры с рукописным посимвольным заполнением.

Библиографический список

1. Провоторский А. О. Методы и средства защиты бумажных документов от подделки при минимизации стоимости листа / А. О. Провоторский // Научный Альманах. – 2016. – № 4–3 (18). – С. 156–158. – DOI 10.17117/na.2016.04.03.156.
2. Jia Y. A lightweight handwriting recognition system based on an improved convolutional neural network / Y. Jia, Y. Zhao, Y. Zhang, S. Fan // The ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – P. 30–35. – DOI 10.1145/3436369.3436463.
3. Behera R. K. A smart document converter: Conversion of handwritten text document to computerized text document / R. K. Behera, B. Padhi // Studies in Computational Intelligence. – 2021. – № 907. – P. 153–166. – DOI 10.1007/978-3-030-50641-4_9123.
4. Li C. M., Hu P., Lau W. C. AuthPaper – Protecting paper-based documents/credentials using authenticated 2D barcodes / C. M. Li, P. Hu, W. C. Lau // MobiSys : proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. – 2014. – 348 p. – DOI 10.1145/2594368.2601468.
5. IDX: официальный сайт. – ООО «Системы управления идентификацией», 2021. – Режим доступа: <https://iidx.ru>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.04.2021).
6. Azhmukhamedov I. Identification of personality based on electronic documents with increased security level / I. Azhmukhamedov, N. Poletayev, A. Stanishevskaya // Caspian Journal: Control and High Technologies, 2019. – № 2 (46). – P. 170–179.
7. Ahmad F. Paper Document Authentication Using Print-Scan Resistant Image Hashing and Public-Key Cryptography (2019) Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) / F. Ahmad, L.-M. Cheng // 11611 LNCS. – 2019. – P. 157–165. – DOI 10.1007/978-3-030-24907-6_13.
8. Патент № RU 157246 U1 Российская Федерация. Система защиты от подделок многотиражных документов строгой отчетности : № 2014147705/08 : заявл. 26.11.2014 : опубл. 27.11.2015 / Д. А. Блудов, В. Н. Богданов, П. С. Вихлянец ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦентрИнформ».
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618919 Российская Федерация. Единая информационная система «Электронный Университет» : № 2018615462 : заявл. 28.05.2018 : опубл. 23.07.2018 / Д. Н. Петров, М. Ю. Васильев, И. В. Бабичев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» (СПбГТИ (ТУ)).
10. Andreeva E. I. Document Recognition Method Based on Convolutional Neural Network Invariant to 180 Degree Rotation Angle / E. I. Andreeva, V. V. Arlazarov, A. V. Gayer et al. // Journal of Information Technologies and Computing Systems. – 2019. – № 4. – P. 87–93. – DOI 10.14357/20718632190408.

References

1. Provotorskiy. A. Metody i sredstva zashchity bumazhnykh dokumentov ot poddelki pri minimizatsii stoimosti lista [Methods and means of protection of paper documents from a fake at minimization of cost of a leaf]. *Nauchnyy Almanakh* [Science Almanac], 2016, no. 4–3 (18), pp. 156–158. DOI 10.17117/na.2016.04.03.156.
2. Jia Y., Zhao Y., Zhang Y., Fan S. A lightweight handwriting recognition system based on an improved convolutional neural network. *The ACM International Conference Proceeding Series*, 2020, pp. 30–35. DOI 10.1145/3436369.3436463.
3. Behera R. K., Padhi B. A. Smart document converter: Conversion of handwritten text document to computerized text document. *Studies in Computational Intelligence*, 2021, no. 907, pp. 153–166. DOI 10.1007/978-3-030-50641-4_9.

4. Li C. M., Hu P., Lau W. C. AuthPaper – Protecting paper-based documents/credentials using authenticated 2D barcodes. *MobiSys. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2014. 348 p. DOI 10.1145/2594368.2601468.
5. *IDX: ofitsialnyy sayt – OOO «Sistemy upravleniya identifikatsiyey»* [IDX: official site – OOO «Identity management systems»], 2021. Available at: <https://iidx.ru> (accessed 12.04.2021).
6. Azhmukhamedov I, Poletayev N. Stanishevskaya A. Identification of personality based on electronic documents with increased security level. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2019, no. 2 (46), pp. 170–179.
7. Ahmad F., Cheng L.-M. Paper Document Authentication Using Print-Scan Resistant Image Hashing and Public-Key Cryptography. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 11611 LNCS*, 2019, pp. 157–165. DOI 10.1007/978-3-030-24907-6_13.
8. Bludov D. A., Bogdanov V. N., Vikhlyantsev P. S. *Sistema zashchity ot poddelok mnogotirazhnyh dokumentov strogoj otchetnosti* [The System of protection against counterfeiting of high-circulation documents of strict accountability]. Patent, FSUE «CentrInform», no RU 157246 U1, 2015.
9. Petrov D. N., Vasilyev M. U., Babichev I. V. *Edinaya informatsionnaya sistema «Elektronnyy Universitet». Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM* [Unified information system "Electronic University", Certificate of state registration of a computer program], Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2018, no. 2018618919.
10. Andreeva E. I., Arlazarov V. V., Gayer A. V. et al. Document Recognition Method Based on Convolutional Neural Network Invariant to 180 Degree Rotation Angle. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2019, no. 4, pp. 87–93. DOI 10.14357/20718632190408.

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.090-098
УДК 004.001

**КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ АТАК И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Статья поступила в редакцию 30.04.2021, в окончательном варианте – 15.05.2021.

Володин Илья Владиславович, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2
студент, e-mail: ilya.volodin.02@mail.ru

Путято Михаил Михайлович, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2

кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-9974-7144, e-mail: putyato.m@gmail.com.

Макарян Александр Самвелович, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2

кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-1801-6137, e-mail: msanya@yandex.ru

Евглевский Вячеслав Юрьевич, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2
студент, e-mail: evglevsky-v@mail.ru

В данной статье представлена полная классификация атак с использованием искусственного интеллекта. Были рассмотрены три основных выявленных раздела: атаки на информационные системы и компьютерные сети, атаки на модели искусственного интеллекта (атаки отравления, уклонения, извлечения, атаки на конфиденциальность), атаки на сознание и мнение человека (все типы deepfake). В каждом из этих разделов были выявлены и изучены механизмы атак, в соответствии с ними установлены методы защиты. В заключение был проанализирован конкретный пример атаки с использованием предварительно обученной модели и произведена защита от него с помощью метода модификации входных данных, а именно сжатия изображения с целью избавления от постороннего шума.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, глубокое обучение, машинное обучение, кибербезопасность, модель машинного обучения, атаки отравления, атаки уклонения, атаки на конфиденциальность, атаки извлечения модели, deepfake

**CLASSIFICATION OF ATTACK MECHANISMS AND RESEARCH
OF PROTECTION METHODS FOR SYSTEMS USING MACHINE
LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS**

The article was received by the editorial board on 30.04.2021, in the final version – 15.05.2021.

Volodin Ilya V., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

student, e-mail: ilya.volodin.02@mail.ru

Putyato Michael M., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0001-9974-7144, e-mail: putyato.m@gmail.com

Makaryan Alexander S., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

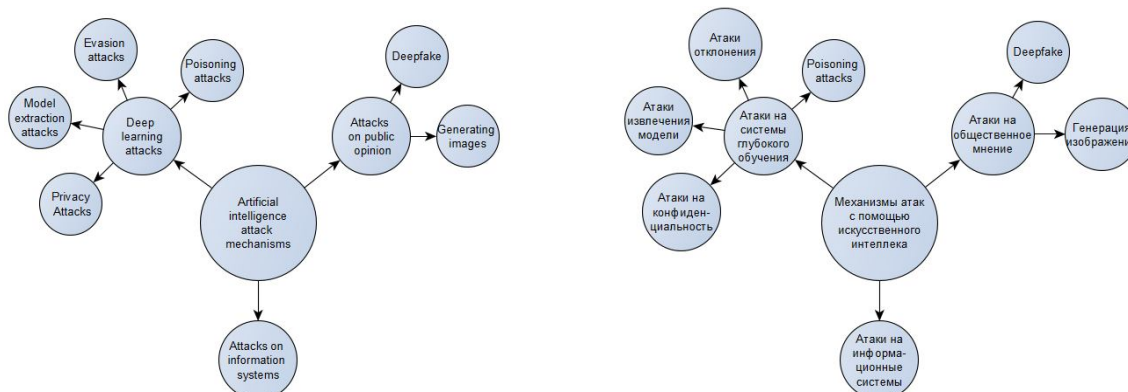
Cand. Sci (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-1801-6137, e-mail: msanya@yandex.ru

Evglevsky Vyacheslav Yu., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation
student, e-mail: evglevsky-v@mail.ru

This article provides a complete classification of attacks using artificial intelligence. Three main identified sections were considered: attacks on information systems and computer networks, attacks on artificial intelligence models (poisoning attacks, evasion attacks, extraction attacks, privacy attacks), attacks on human consciousness and opinion (all types of deepfake). In each of these sections, the mechanisms of attacks were identified and studied, in accordance with them, the methods of protection were set. In conclusion, a specific example of an attack using a pretrained model was analyzed and protected against it using the method of modifying the input data, namely, image compression in order to get rid of extraneous noise.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, deep learning, machine learning cybersecurity, machine learning model, poisoning attacks, evasion attacks, privacy attacks, model extraction attacks, deepfake

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. На сегодняшний день, как и многие другие области информационных технологий, возможности искусственного интеллекта и машинного обучения растут с беспрецедентной скоростью. Искусственный интеллект уже используется в мошенничестве. Первый случай произошел в марте 2019 года, передает The Wall Street Journal [1].

«Преступники использовали программное обеспечение на основе искусственного интеллекта, чтобы выдать себя за голос исполнительного директора и потребовать мошеннического перевода 220 000 евро (243 000 долларов США). Генеральный директор британской энергетической компании подумал, что разговаривает по телефону со своим начальником, исполнительным директором немецкой материнской компании, который попросил его отправить средства венгерскому поставщику. По словам страховой компании Euler Hermes Group SA, звонивший сказал, что запрос был срочным и предписывал руководителю произвести оплату в течение часа. Euler Hermes отказался назвать имена компаний-жертв».

Сейчас мы находимся на стыке между временем, когда ИИ практически не использовался в кибератаках, и временем, когда такие атаки будут распространены повсеместно, поэтому перед специалистами кибербезопасности стоит необходимость тщательно изучить данную область.

В данной статье рассмотрены существующие механизмы атак с использованием искусственного интеллекта и методы защиты от них, с целью дать о них общее представление.

Классификация атак с помощью искусственного интеллекта. Для того чтобы суметь построить надежную защиту любой информационной системы, необходимо хорошо понимать, какие угрозы существуют и как именно их можно заранее нейтрализовать. Одним из типов опасностей являются атаки с помощью ИИ, которые можно разделить на несколько видов, их классификация приведена в таблице 1. Уровень угрозы приведен для сравнения элементов данной таблицы.

Таблица 1 – Классификация угроз с использованием искусственных нейронных сетей

Тип атаки	Атака направлена на	Тип необходимой подготовки	Цель атаки	Уровень угрозы
Использование вредоносного ПО	Информационные системы и компьютерные сети	Разведка средств защиты информационных систем	НСД к ИС и КС	Высокий
Атаки на конфиденциальность	Хранилище данных для обучения нейросети	Определение возможностей получения НСД к данным для обучения	Данные для обучения нейросети	Высокий
Атаки отравления	Хранилище данных для обучения нейросети	Определение возможностей получения НСД к данным для обучения	Изменение результата работы нейросети в определенном случае	Высокий

Продолжение таблицы 1

Атаки извлечения	Хранилище модели	Определение возможностей получения НСД к хранилищу модели	Модель машинного обучения	Высокий
Атаки отклонения	Входные данные для обученной нейронной сети	Определение принципа работы модели	Изменение результата работы нейросети в определенном случае	Высокий
Deepfake	Человеческое сознание и общественное мнение	Получение исходных данных для подделки	Управление обществом, группой людей или индивидом	Очень высокий
Генерация изображений	Человеческое сознание и общественное мнение	Не требуется	Управление обществом, группой людей или индивидом	Низкий
Создание фальшивых личностей	Человеческое сознание и общественное мнение	Не требуется	Управление обществом, группой людей или индивидом	Низкий

Атаки на безопасность информационных систем и компьютерных сетей. Данный вид атак наиболее распространен в цифровой области кибербезопасности [2, 3]. Злоумышленникам стали доступны более совершенные атаки, искусственный интеллект открыл новые просторы для нахождения уязвимостей и их использования. Атаки чрезвычайно опасны, так как способы противодействия не разработаны в должной мере, однако существующие базируются на нейронных сетях.

Все атаки данного вида сводятся к использованию существующих уязвимостей в информационных системах, после обнаружения которых, посредством проникновения в сети и благодаря наличию необходимого вредоносного программного обеспечения происходит нарушение работы системы.

Атаки на общественное мнение.

1. Deepfake текст [4]. Ранее сгенерированные нейросетью тексты были легко различимы человеческим взглядом, однако в наши дни современные языковые модели могут писать тексты, близкие по подаче и убедительности к написанным человеком [5, 6].

2. Deepfake видео. Так же, как и в случае с текстом, машины научились использовать существующий видеоряд, редактируя его с использованием ложного аудио. Еще один подход – синтез лица, оживленного движениями другого человека, но с чертами жертвы. Все подобные deepfake видео обладают артефактами, «проблесками в матрице», которые способны различать deepfake детекторы.

3. Deepfake аудио. Нейронные сети, как и в остальных случаях, могут подделать голос. Небольшой набор данных – примеры голоса, аудиозаписи – все, что необходимо для воссоздания речи жертвы. Одной из мер противодействия является представление аудиозаписи в виде математической функции с помощью другой нейронной сети, так можно будет сравнить оригинал и сгенерированную версию, найдя отличия.

4. Генерация изображений и фальшивых личностей. Схоже с deepfake атаками. Используется в качестве создания массы личностей, которые будут исполнять роль реальных людей. Пример неотличимого от реального изображения приведен на рисунке 1 (а).

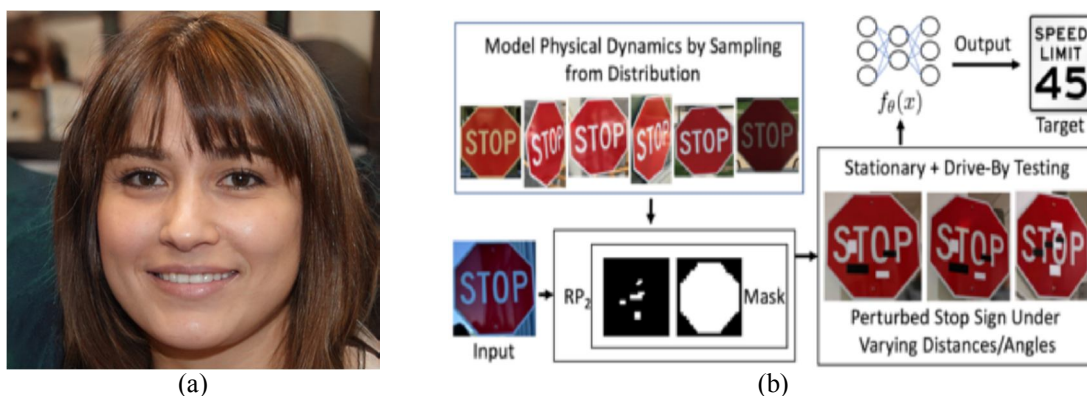


Рисунок 1 – (а) Изображение, сгенерированное искусственным интеллектом [7]. (б) Пример отклоняющей атаки [8]

Атаки на безопасность систем глубокого обучения.

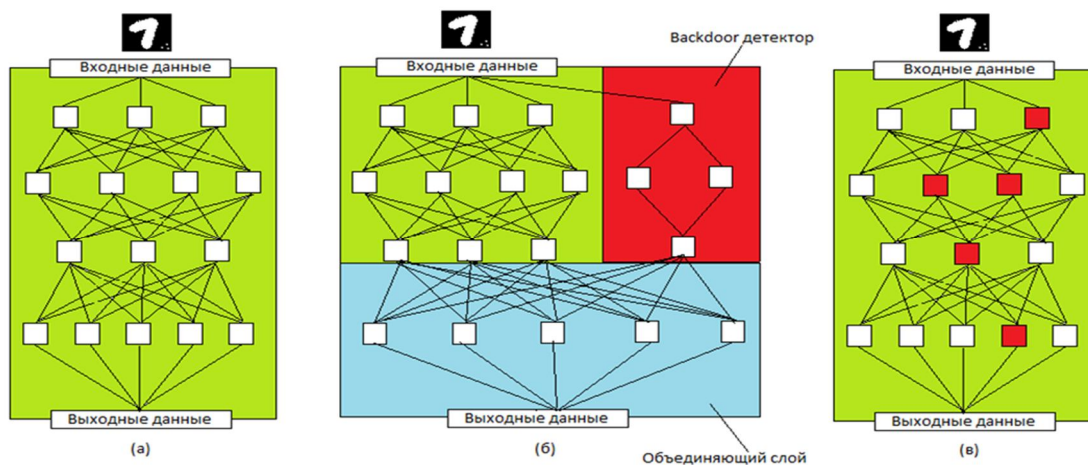


Рисунок 2 – Пример отравляющей атаки. Искусственный интеллект должен корректно различать белые цифры на черном фоне, но backdoor в виде трех белых точек в нижнем правом углу меняет ситуацию [9]. (а) Здоровая нейронная сеть. (б) Нейронная сеть с детектором backdoor, ярко иллюстрирует структуру атаки, однако она не применима на практике из-за легкости обнаружения. (с) Нейронная сеть с измененными весами узлов, уже применимая на практике отравляющая атака

Рассмотрим подробнее каждый вид атак на системы глубокого обучения:

1. Отравляющие атаки [8, 9]. Реализуются в процессе обучения. Сценарий атаки – так называемое «отравление информации». Данные для обучения дополняются необходимыми злоумышленнику материалами, что обеспечивает неверное обучение нейросети для определенных ситуаций. Суть данной атаки на нейросеть заключается в том, чтобы принудить ее делать что-то, не совпадающее с изначальной моделью на конкретном примере. Изображения нейронной сети на различных этапах приведены на рисунке 2.

2. Отклоняющие атаки (атаки уклонения) [10, 11]. Производятся злоумышленниками на те модели машинного обучения, которые успешно прошли обучение на достоверных данных и достигли высокой точности при любой задаче. Однако манипулирование входными данными позволяет сделать так, чтобы система достигла цели, заданной не разработчиком, а нарушителем. Пример данной атаки, реализуемой путем использования другой нейронной сети, накладывающей шум на маску, приведен на рисунке 1 (б).

3. Атаки на конфиденциальность [12, 13]. Производятся либо на информацию, с помощью которой обучают нейросеть, так называемые датасеты, либо на модель нейронной сети.

4. Атаки извлечения [14]. Атака извлечения модели пытается дублировать модель машинного обучения через предоставленные API без предварительного знания обучающих данных и алгоритмов. Атаки извлечения модели не только разрушают конфиденциальность модели и наносят ущерб интересам ее владельцев, но также создают почти эквивалентную модель белого ящика для дальнейших атак, таких как состязательная атака.

Методы противодействия классифицированным атакам. Как известно, каждому действию есть противодействие, а значит, от каждой атаки найдется соответствующая защита, для каждого рассмотренного метода нарушить безопасность информационной системы приведены соответствующие механизмы защиты. Они не являются ультимативными, но способны обеспечить должную защищенность:

1. Атаки на безопасность информационных систем и компьютерных сетей. Каждая защитная система – уникальна, обладает собственным набором защитных функций, каждое нападение – уникально, обладает собственным набором атакующих функций, набором поставленных целей. Соответственно, можно дать только общие рекомендации, например, использование искусственного интеллекта для определения уязвимостей и факта нападения, для защиты от атаки. Для рядового пользователя будет эффективным использование антивирусов Next Generation Endpoint Protection [15].

2. Атаки на конфиденциальность [16]. Существует набор способов защиты конфиденциальности используемых данных:

2.1. Не раскрывать API, на знание которого полагаются злоумышленники. Выставляйте только жесткие ярлыки, а не оценки достоверности [17].

2.2. Очистка данных. Всегда есть возможность отфильтровать данные, избегая утечки определенного их типа.

2.3. Выбор модели. Например, модели Байеса более надежны, чем деревья решений.

2.4. Контроль соответствия. В целом переобучение упрощает извлечение данных из вашей модели, поэтому использование регуляризации – хорошая идея.

2.5. Контроль знаний. Ограничение модели и ее разработки небольшой группой людей поможет предотвратить утечку знаний, полезных для злоумышленника.

2.6. Обнаружение. Чтобы извлечь какие-либо данные из модели, злоумышленникам придется запрашивать их множество раз. Шаблоны их запросов, вероятно, будут отличаться от тех, что будут делать ваши реальные пользователи, и, следовательно, станут хорошим материалом для обнаружения аномалий.

2.7. Дифференцированная конфиденциальность. Это теоретическая основа, цель которой предоставить формальную гарантию надежности. В частности, она направлена на доказательство того, что две модели, отличающиеся ровно на одну выборку, будут давать аналогичные прогнозы (что делает невозможным вывод этой выборки). Есть несколько способов сделать это:

2.7.1. Возмущать ввод данных пользователя.

2.7.2. Возмущать лежащие в основе данные.

2.7.3. Изменять параметры модели.

2.7.4. Возмущать функцию потерь.

2.7.5. Возмущать выходные данные во время прогнозирования.

Однако использование дифференциальной конфиденциальности снижает точность модели, что в итоге, при чрезмерном ее использовании, может привести модель в полную негодность.

3. Атаки отравления [18]. Существует несколько эффективных способов обнаружения факта отравления данных (но ни один из них не гарантирует надежности в 100 % случаев). Самыми распространенными являются два способа:

3.1. Обнаружение выбросов или аномалий. Отравленные данные отличаются от чистых, а значит это можно обнаружить, создав систему фильтрации данных. При минимальных отличиях либо при введении яда до создания правил фильтрации обнаружение выбросов не работает.

3.2. Анализ влияния недавно добавленных обучающих выборок на точность модели. Идея состоит в том, что, если собранные входные данные являются ядовитыми, они нарушат точность модели на тестовом наборе, и, выполнив запуск в песочнице с новым образцом перед добавлением его в производственный обучающий пул, мы сможем это обнаружить.

4. Атаки отклонения [19]. Существует два основных типа защитных методов.

4.1. Формальные методы. Методы, которые математически проверяют работоспособность системы для каждого набора данных, что гарантированно поможет вычислить возможные отклонения. Однако формальные методы слишком затратны, требуют неисчислимого количества итераций, чаще всего нереализуемы.

4.2. Эмпирические методы. Полагаются на эксперименты, демонстрирующие эффективность защиты. Существует множество эмпирических методов, некоторые из них:

4.2.1. Состязательная подготовка. Во время состязательного обучения защитник переобучает модель с состязательными примерами, включенными в тренировочный пул, но помеченными правильными метками. Это учит модель игнорировать шум и учиться только на «надежных» функциях. Эффективно защищает от тех же атак, которые использовались для создания примеров, изначально включенных в обучающий пул. При этом, невозможно добавлять бесконечное количество состязательных примеров, так как граница, которая изучается моделью, может стать бесполезной.

4.2.2. Модификация входных данных. Происходит, когда входные данные перед передачей в модель каким-то образом «очищаются», чтобы избавиться от постороннего шума. Примеры включают в себя всевозможные решения для шумоподавления (автокодеры, репрезентативные шумоподавители высокого уровня), уменьшение глубины цвета, сглаживание, преобразование GAN, сжатие JPEG, фовеацию, отклонение пикселей, преобразования общих базовых функций и многие другие.

4.2.3. Обнаружение. Некоторые методы обнаружения тесно связаны с модификацией входных данных – после очистки входных данных его прогноз можно сравнить с исходным прогнозом, и, если они находятся далеко друг от друга, вероятно, что вход был изменен.

В целом эмпирические защиты несовершенны, но они работают и иногда требуют всего несколько строк кода. И пусть это вечная игра в кошки-мышки защитника и атакующего, но победа в ней может принести полезные плоды.

5. Атаки извлечения. Являются по своей сути подразделом атак на конфиденциальность, что приводит к сходству методов защиты, что уже рассмотрены выше.

6. Deepfake [20, 21]. Данный метод атаки весьма сложно выявить и распознать, тем самым защитившись от него, так как для человеческих органов чувств качественную подделку отличить невозможно. В данный момент проводится конкурс на лучшее определение Deepfake видео [22]. Для защиты также необходимо использовать искусственный интеллект. Известные способы включают в себя анализ моргания [23], определение наличия артефактов положения головы [24], анализ выражения лица и мимики [25]. Однако основным методом защиты все еще остается использование корпоративных коммуникаций [20, 21].

7. Генерация изображений и создание фальшивых личностей. Так же, как и для Deepfake, определить сгенерированные изображения весьма сложно, ведутся исследования на данную тему, из существующих методов защиты следует отметить частотный анализ изображения [26].

Пример применения метода защиты. В качестве примера применения метода защиты может выступать сжатие изображения JPG для избавления от постороннего шума при попытке отклоняющей атаки [27], так как это один из самых простых и при этом самый показательный метод. В качестве зараженного изображения выступил специально созданный состязательный пример.



Рисунок 3 – (a) Созданный состязательный пример ($\epsilon = 10$). (b) Сжатое и после восстановленное изображение

Функция генерации состязательных примеров [13]:

$$\text{Adv}_\epsilon(x) = x + \eta_\epsilon(x), \quad (1)$$

где

$$\eta_\epsilon(x) = \frac{\epsilon}{255} \text{sign}(\nabla_{x'} J(x', \omega, y) |_{x'=x, y=y_x}). \quad (2)$$

Градиент изображения $\nabla_{x'} J(x', \omega, y)$ может быть эффективно вычислен с использованием обратного распространения, $\epsilon \in \{1, 5, 10\}$.

Изначально, предварительно обученная модель OverFeat [28] оценивала состязательный пример как «агама» с точностью, близкой к нулю. После сжатия до такого размера, когда самое маленькое измерение было равно 256, обрезки в виде квадрата со стороной 221 и затем стандартизации, модель дала изображению метку «агама» с вероятностью 0,96.

Заключение. В данной статье была проведена классификация способов атаковать с помощью искусственного интеллекта, кратко изучены каждый из них. Помимо этого, для каждого типа возможных атак были структурированы и приведены способы защиты и предупреждения.

Все вышеперечисленное позволяет получить базовое представление о текущем этапе развития современных систем искусственного интеллекта, о механизмах атак и методах защиты для систем глубокого машинного обучения и искусственных нейронных сетей, для лучшего понимания, в каком конкретном направлении необходимо будет двигаться в каждом конкретном случае, если специалист впервые сталкивается с использованием искусственного интеллекта в сфере кибербезопасности.

Библиографический список

1. Fraudsters Used AI to Mimic CEO's Voice in Unusual Cybercrime Case // The Wall Street Journal. – Режим доступа: <https://www.wsj.com/articles/fraudsters-use-ai-to-mimic-ceos-voice-in-unusual-cybercrime-case-11567157402>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

2. Пулято М. М. Кибербезопасность как неотъемлемый атрибут многоуровневого защищенного киберпространства / М. М. Пулято, А. С. Макарян // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3 (51). – С. 94–102.

3. Пулято М. М. Адаптивная система комплексного обеспечения безопасности как элемент инфраструктуры ситуационного центра / М. М. Пулято, А. С. Макарян, А. Н. Черкасов, И. Г. Горин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 4 (52). – С. 75–84.

4. Voximplant Deepfakes и deep media: Новое поле битвы за безопасность. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/Voximplant/blog/501068/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. OpenAI releases curtailed version of GPT-2 language model // VentureBeat. – Режим доступа: <https://venturebeat.com/2019/08/20/openai-releases-curtailed-version-of-gpt-2-language-model/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
6. The Next Word. Where will predictive text take us? // New Yorker. – Режим доступа: <https://www.newyorker.com/magazine/2019/10/14/can-a-machine-learn-to-write-for-the-new-yorker>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
7. Karras T. Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN / T. Karras et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1912.04958>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
8. Eykholt K. Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models / K. Eykholt et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1707.08945>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
9. Gu T. BadNets: Evaluating Backdooring Attacks on Deep Neural Networks / T. Gu, K. Liu, B. Dolan-Gavitt, S. Garg. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8685687>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
10. Vladimir Arlazarov. Машинное обучение: границы доверия и угрозы. – Режим доступа: <https://vc.ru/ml/167318-mashinnoe-obucheniye-granicy-doveriya-i-ugrozy>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
11. Насколько неуязвим искусственный интеллект? // Smart Engines. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/smartengines/blog/528686/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Ranjan A. Attacking Optical Flow / A. Ranjan, J. Janai, A. Geiger, M. J. Black – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1910.10053>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
13. Goodfellow I. J. Explaining and Harnessing Adversarial Examples / I. J. Goodfellow, J. Shlens, C. Szegedy. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.6572>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
14. He Yi. Towards Security Threats of Deep Learning Systems: A Survey / Yi. He et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1911.12562>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
15. What Is Next-Gen Endpoint Security? // McAfee. – Режим доступа: <https://www.mcafee.com/enterprise/ru-ru/security-awareness/endpoint/what-is-next-gen-endpoint-protection.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
16. Moisejevs I. Privacy attacks on Machine Learning / I. Moisejevs – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/privacy-attacks-on-machine-learning-a1a25e474276>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
17. Grandperrin J. How to use confidence scores in machine learning models / J. Grandperrin. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/how-to-use-confidence-scores-in-machine-learning-models-abe9773306fa>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
18. Moisejevs I. Poisoning attacks on Machine Learning / I. Moisejevs. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/poisoning-attacks-on-machine-learning-1ff247c254db>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
19. Moisejevs I. Evasion attacks on Machine Learning / I. Moisejevs. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/evasion-attacks-on-machine-learning-or-adversarial-examples-12f2283e06a1>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
20. Панасенко А. Технологии Deepfake как угроза информационной безопасности / А. Панасенко. – Режим доступа: https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats_Analysis/Deepfakes-as-a-information-security-threat, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
21. A. Drozhzhin. Как защититься от дипфейков / А. Drozhzhin. – Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/blog/rsa2020-deepfakes-mitigation/27678/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
22. Schroepfer M. Creating a dataset and a challenge for deepfakes / M. Schroepfer. – Режим доступа: <https://ai.facebook.com/blog/deepfake-detection-challenge>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
23. Li Yu. In Ictu Oculi: Exposing AI Generated Fake Face Videos by Detecting Eye Blinking / Yu. Li et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1806.02877>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
24. Li Yu. Exposing DeepFake Videos By Detecting Face Warping Artifacts / Yu. Li, S. Luu. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1811.00656>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
25. Gu Yu. Protecting World Leaders Against Deep Fakes / Yu. Gu et al. – Режим доступа: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/papers/Media%20Forensics/Agarwal_Protecting_World_Leaders_Against_Deep_Fakes_CVPRW_2019_paper.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
26. Weiler J. Recognising fake images using frequency analysis / J. Weiler, C. Scholten. – Режим доступа: <https://news.rub.de/english/press-releases/2020-07-16-information-technology-recognising-fake-images-using-frequency-analysis>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
27. Karolina G. A study of the effect of JPG compression on adversarial images / G. Karolina et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1608.00853>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
28. Sermanet P. OverFeat: Integrated Recognition, Localization and Detection using Convolutional Networks / P. Sermanet et al. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1312.6229>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Fraudsters Used AI to Mimic CEO's Voice in Unusual Cybercrime Case. *The Wall Street Journal*. Available at: <https://www.wsj.com/articles/fraudsters-use-ai-to-mimic-ceos-voice-in-unusual-cybercrime-case-11567157402>.
2. Putyato M. M., Makaryan A. S. Kiberbezopasnost kak neotyemlemy atribut mnogourovnevnogo zashchishchennogo kiberprostranstva [Cybersecurity as an integral attribute of a multi-layered secure cyberspace]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 3 (51).
3. Putyato M. M., Makaryan A. S., Cherkasov A. N., Gorin I. G. Adaptivnaya sistema kompleksnogo obespecheniya bezopasnosti kak element infrastruktury situatsionnogo tsentra [An adaptive integrated security system as an element of the situation center infrastructure]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 4 (52).
4. *Voximplant Deepfakes i deep media: Novoye pole bitvy za bezopasnost* [Voximplant Deepfakes and deep media: A new battleground for security]. Available at: <https://habr.com/ru/company/Voximplant/blog/501068>.
5. OpenAI releases curtailed version of GPT-2 language model. *VentureBeat*. Available at: <https://openai.com/blog/openai-five-defeats-dota-2-world-champions>.
6. The Next Word. Where will predictive text take us? *New Yorker*. Available at: <https://www.wsj.com/articles/fraudsters-use-ai-to-mimic-ceos-voice-in-unusual-cybercrime-case-11567157402>.
7. Karras T. et al. *Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1912.04958>.
8. Eykholt K. et al. *Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1707.08945>.
9. Gu T., Liu K., Dolan-Gavitt B., Garg S. *BadNets: Evaluating Backdooring Attacks on Deep Neural Networks*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8685687>.
10. Arlazarov V. *Machine Learning: Trust Boundaries and Threats*. Available at: <https://vc.ru/ml/167318-mashinnoe-obuchenie-granicy-doveriya-i-ugrozy>.
11. *How invulnerable is artificial intelligence? Smart Engines*. Available at: <https://habr.com/ru/company/smartengines/blog/528686/>.
12. Ranjan A., Janai J., Geiger A., Black M. J. *Attacking Optical Flow*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1910.10053>.
13. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. *Explaining and Harnessing Adversarial Examples*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6572>.
14. He Y. et al. *Towards Security Threats of Deep Learning Systems: A Survey*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1911.12562>.
15. *What Is Next-Gen Endpoint Security? McAfee*. Available at: <https://www.mcafee.com/enterprise/ru-ru/security-awareness/endpoint/what-is-next-gen-endpoint-protection.html>.
16. Moisejevs I. *Privacy attacks on Machine Learning*. Available at: <https://towardsdatascience.com/privacy-attacks-on-machine-learning-a1a25e474276>.
17. Grandperrin J. *How to use confidence scores in machine learning models*. Available at: <https://towardsdatascience.com/how-to-use-confidence-scores-in-machine-learning-models-abe9773306fa>.
18. Moisejevs I. *Poisoning attacks on Machine Learning*. Available at: <https://towardsdatascience.com/poisoning-attacks-on-machine-learning-1ff247c254db>.
19. Moisejevs I. *Evasion attacks on Machine Learning*. Available at: <https://towardsdatascience.com/evasion-attacks-on-machine-learning-or-adversarial-examples-12f2283e06a1>.
20. Panasenko A. *Tekhnologii Deepfake kak ugroza informatsionnoy bezopasnosti* [Deepfake technologies as a threat to information security]. Available at: malware.ru/analytics/Threats_Analysis/Deepfakes-as-a-information-security-threat.
21. Drozhzhin A. *How to protect yourself from deepfakes*. Available at: <https://www.kaspersky.ru/blog/rsa2020-deepfakes-mitigation/27678/>.
22. Schroeffer M. *Creating a dataset and a challenge for deepfakes*. Available at: <https://ai.facebook.com/blog/deepfake-detection-challenge>.
23. Li Yu. et al. *In Ictu Oculi: Exposing AI Generated Fake Face Videos by Detecting Eye Blinking*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1806.02877>.
24. Li Y., Lyu S. *Exposing DeepFake Videos By Detecting Face Warping Artifacts*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1811.00656>.
25. Gu Y. et al. *Protecting World Leaders Against Deep Fakes*. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/papers/Media%20Forensics/Agarwal_Protecting_World_Leaders_Against_Deep_Fakes_CVPRW_2019_paper.pdf.
26. Weiler J., Scholten C. *Recognising fake images using frequency analysis*. Available at: <https://news.rub.de/english/press-releases/2020-07-16-information-technology-recognising-fake-images-using-frequency-analysis>.
27. Karolina G. et al. *A study of the effect of JPG compression on adversarial images*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1608.00853>.
28. Sermanet P. et al. *OverFeat: Integrated Recognition, Localization and Detection using Convolutional Networks*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1312.6229>.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.324

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПРЕССОРНЫМИ СТАНЦИЯМИ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОКАЧКИ ГАЗА В ГАЗОПРОВОДЕ

Статья поступила в редакцию 05.04.2021, в окончательном варианте – 28.04.2021.

Юрков Николай Кондратьевич, Пензенский государственный университет, 114056, Российская Федерация, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-2425-3470, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Штыков Роман Александрович, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, 602200, Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, 23,

кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-3763-5339, e-mail: ipmrroman@yandex.ru

В работе выявляются особенности снижения надежности и состояния безопасности при транспортировке газа по магистральным газопроводам, которые обусловлены изменениями гидродинамических параметров потока и примесных показателей газа в этих газопроводах, установление закономерностей изменения гидравлических и качественных показателей потока газа по трубе, разработка научно обоснованных предложений по созданию надежной и безопасной системы газоснабжения. Результаты экспериментов, доказывают, что многократное повышение концентрации примесей различного характера в различных узлах подачи и прокачки газа обусловлены нарушением гидравлического режима функционирования всей системы. Экспоненциально возрастающие, экспоненциально понижающие, а также линейные законы регулирования расходов подачи газа определили механизмы изменения концентрации примесей различного характера, а также изменения давления в системе газоснабжения по всей длине газопровода. При этом учитывалось, что движение газа по напорным трубопроводам причисляется к квадратичной площади противодействия (автомодельное движение) гидромеханическое макетирование выполняется с употреблением аспекта динамического сходства – аспектом Фруда. Данный критерий характеризует сравнительную величину массы тяжести, он представляется устанавливающим в тех случаях, иногда для движения газа гравитационные моменты играют приметную роль. Принималось во внимание, что движение газа в магистральных газопроводах из-за турбулентности можно описать через квадратичную область сопротивления (модуль расхода и модуль скорости), тогда моделирование гидравлического расчета осуществляется с использованием критерия подобия движения – критерий Фруда. Этот показатель будет учитывать любые воздействия внешних сил, особенно его использование необходимо если при транспортировке газа факторы гравитации играют заметную роль.

Ключевые слова: газовая линия, газ, контроль, оптимизация, управление, концентрация

OPERATIONAL CONTROL OF COMPRESSOR STATIONS TO CHANGE GAS PUMPING IN THE GAS PIPELINE

The article was received by the editorial board on 05.04.2021, in the final version – 28.04.2021.

Yurkov Nikolay K., Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0002-2425-3470, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Shtykov Roman A., Murom Institute (branch) of Vladimir State University, 23 Orlovskaya St., Murom, 602200, Russian Federation,

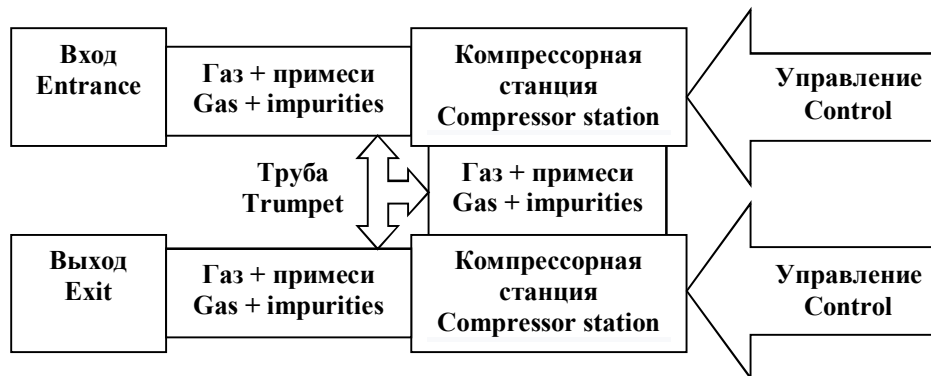
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-3763-5339, e-mail: ipmrroman@yandex.ru

The work reveals the features of the decrease in reliability and the state of safety during gas transportation due to changes in the hydrodynamic parameters of the flow and impurity indicators of gas in pressure gas pipelines, the establishment of regularities in the change in the hydraulic and quality indicators of the gas flow, the development of scientifically substantiated proposals for the creation of a reliable and safe gas supply system. The results of experiments prove that a multiple increase in the concentration of impurities of a different nature in the gas supply units is due to a violation of the hydraulic mode of the system. The exponentially increasing, exponentially decreasing,

as well as linear laws of regulation of gas supply rates determined the mechanisms of changes in the concentration of impurities of various nature, as well as changes in pressure in the gas supply system along the entire length. It was taken into account that the movement of gas in pressure pipelines refers to the quadratic region of resistance (self-similar movement), hydraulic modeling is carried out using the criterion of dynamic similarity – the Froude criterion. This criterion characterizes the relative magnitude of the force of gravity, it is decisive in cases when gravitational factors play a significant role for the movement of gas.

Keywords: gas line, gas, control, optimization, control, concentration

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. При разработке модели процесса, необходим наиболее полный учет свойств смеси, так как при наличии сил давления, которое создается компрессорными станциями и сил трения, создаваемые продуктами засорения труб, возникает необходимость произвести гидравлическое моделирование с использованием числа Рейнольдса [1, 7]. В рассматриваемом нами случае, когда продукты засорения внутренней части труб создали условия к резкому увеличению гидравлического сопротивления труб, тогда возмущения, создаваемое компрессорными станциями попадают под воздействие противоположно направленное влияние сил трения. Поэтому при моделировании процессов диффузионного движения потока газа с примесями в напорных трубопроводах используем два критерия динамического подобия гидравлических явлений критерий Фруда и Рейнольдса [2, 7].

Материалы и методы. Используем уравнения баланса объемов газа и концентрации примесей, тогда изменение общего объема газа в сети определяется равенством [3, 10]:

$$W_{\text{год}}(t) = \begin{cases} W(t_0) + W_{np}(t), nпу..t_0 \leq t \leq t^* \\ W(t^*) + W_{np}^{(1)}(t) - W_{омс}^*(t), nпу..t^* < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

Изменение объема газа и концентрации примесей в газопроводной сети:

Объем газа:

$$W^{(e)}_{\text{год}}(t) = \begin{cases} W(t_0)(1 - c_0) + W_{np}(t)(1 - c_{np}), nпу..t_0 \leq t \leq t^* \\ W(t^*)(1 - c_0) + W_{np}^{(1)}(t)(1 - c_{np}^1) - W_{омс}^*(t)(1 - c^*) \end{cases}$$

Объем примесей:

$$W^{(s)}_{\text{год}}(t) = \begin{cases} W(t_0) + W_{np}(t)c_{np}, nпу..t_0 \leq t \leq t^* \\ W(t^*)c^* + W_{np}^{(1)}(t)c_{np}^{(1)} - W_{омс}^*(t)c^*, nпу..t^* < t \leq T \end{cases}$$

$$\text{где } W_{np}(t) = \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt, W_{np}^{(1)} = \int_{t^*}^t Q_{np}^{(1)}(t) dt, W_{омс}^* = \int_{t^*}^t Q_{омс}^*(t) dt$$

Тогда изменение концентрации в газопроводе определяется равенством при $t_0 \leq t \leq t^*$

$$c^*(t) = \frac{W(t_0)c_0 + W_{np}(t)c_{np}}{W(t_0) + W_{np}(t)} = \frac{W_0c_0 + c_{np} \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt}{W_0 + \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt} \quad (2)$$

При $t^* < t \leq T$

$$c_1^*(t) = \frac{W(t^*)c^* + W_{np}^{(1)}(t)c_{np}^{(1)} - W_{омс}^*c^*}{W(t^*) + W_{np}^{(1)}(t) - W_{омс}^*} \quad (3)$$

В уравнениях приняты обозначения:

$Q_{np}(t)$ – подача компрессорной станцией M^3/c , $Q_{np}^*(t)$ – величина потребного расхода, M^3/c ; $W_{\text{год}}^{(s)}$ – объем газа в газопроводной сети в период остановки компрессорной станции M^3 ; $W^{(s)}(t^*)$ – объем газа в газопроводе в момент времени t^* ; $W_{np}^{(s)}$ – объем притока газа в сеть; $W_{om}^{(s)}$ – объем оттока из сети; c_{np} – концентрация примесей на единицу объема газа на выходе из компрессорной станции, число / M^3 ; c^* – величина ПДК, число / M^3 ; $W_{\text{год}}^{(s)}$ – объем газа с примесями в сети в момент функционирования компрессорной станции; Т-продолжительность работы компрессорной станции; $W^{(s)}(t^*), W_{np}^{(s)}, W_{om}^{(s)}$ – объемы газа с примесями соответствующие в момент времени t , притока и оттока из сети в период работы компрессорной станции;

Принимая экспоненциально возрастающий закон изменения расхода газа [4, 5, 9]:

$$Q_{np}(t) = Q_{np}^0 \exp(-\lambda t), c = const, \quad (4)$$

где λ – коэффициент, который определяется $\alpha \frac{W_0}{Q_{np}^0} = \lambda$, где α – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение размера нагнетательной трубы компрессора и размера трубы газопровода.

Тогда

$$\int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt = Q_{np}^0 \int_{t_0}^t \exp(-\lambda t) dt = -\frac{Q_{np}^0}{\lambda} [\exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)]. \quad (5)$$

Откуда имеем

$$\int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt = \frac{Q_{np}^0}{\lambda} [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)]. \quad (6)$$

С учетом (6) из (4), (5) уравнений получаем динамику изменения концентрации примесей в газе, когда компрессорная станция третьего подъема работает по экспоненциальному закону:

$$c(t) = \frac{W_0 c_0 + \frac{Q_{np}^0}{\lambda} [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)] c_{np}}{W_0 c_0 + \frac{Q_{np}^0}{\lambda} [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)]}. \quad (7)$$

Для достижения необходимого уровня ПДК примесей компрессорная станция третьего подъема должна обеспечивать давление в сети, величина такого давления определяется уравнением.

$$P(t) = P_0 + \frac{E_0}{c_{np}} \cdot \frac{Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)]}{\lambda W_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)]}. \quad (8)$$

В (8) принимается во внимание, что в сети газ сжимается под давлением подаваемой компрессорной станцией. Тогда изменение концентрации примесей в сети изменяется по зависимости:

$$c(t) = \frac{\lambda W_0 c_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)] c_{np}}{\lambda W_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t)]}. \quad (9)$$

В момент $t = t^*$ концентрация примесей достигает ПДК $c_{np} < c^* < c_0$, тогда

$$c(t^*) = c^* = \frac{\lambda W_0 c_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t^*)] c_{np}}{\lambda W_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t^*)]}. \quad (10)$$

В данной задаче возникает необходимость определения времени работы компрессорной станции, для чего (10) зависимость переписываем в виде [3, 5, 6, 9]:

$$c^* \lambda W_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t^*)] c^* = \lambda W_0 c_0 + Q_{np}^0 [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t^*)] c_{np} \cdot \lambda W_0 (c_0 - c^*) \quad (11)$$

$$= Q_{np}^0 (c^* - c_{np}) [\exp(-\lambda t_0) - \exp(-\lambda t^*)].$$

Элементы, входящие в (11):

$$\exp(-\lambda t^*) = \exp(-\lambda t_0) + \frac{\lambda W_0 (c_0 - c^*)}{Q_{np}^0 (c^* - c_{np})} - \lambda t^* = \ln \left[\exp(-\lambda t_0) + \frac{\lambda W_0 (c_0 - c^*)}{Q_{np}^0 (c^* - c_{np})} \right] \quad (12)$$

$$-\lambda t^* = \ln \left[\exp(-\lambda t_0) \left[1 + \frac{\lambda W_0 (c_0 - c^*)}{Q_{np}^0 (c^* - c_{np})} \exp(\lambda t_0) \right] \right] - \lambda t^* = -\lambda t_0 + \ln \left[1 + \frac{\lambda W_0 (c_0 - c^*)}{Q_{np}^0 (c^* - c_{np})} \exp(\lambda t_0) \right].$$

Время функционирования компрессорной станции третьего подъема определяется по:

$$t^* = t_0 - \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{\lambda W_0 (c_0 - c^*)}{Q_{np}^0 (c^* - c_{np})} \exp(\lambda t_0) \right]. \quad (13)$$

Для достижения концентрации примесей в газе газопроводной сети до уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) т.е. $c_{np} < c^* < c_0$ необходимое время работы компрессорной станции определяется выражением:

$$t^* = t_0 - \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{(c_0 - c^*)}{(c_{np} - c^*)} \exp(\lambda t_0) \right]. \quad (14)$$

Для организации оперативного вмешательства в негативный процесс распространения примесей различного характера в системах принимаем метод управления подачи газа из компрессорной станции, подчиняющегося по экспоненциально понижающему закону [7, 10]:

$$Q_{np}(t) = Q_{np}^0 [1 - \exp(-\lambda t)], \quad (15)$$

где $Q_{np}(t)$ – приток газа с момента $t = t_0$ и до момента t^* , которое определяется в процессе решения; Q_{np}^0 – приток газа в момент $t = t_0$. Тогда изменение объема газа в газопроводе определяется равенством:

$$W(t) = W_0 + \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt = W_0 + Q_{np}^0 \int_{t_0}^t (1 - \exp(-\lambda t)) dt = W_0 + Q_{np}^0 \left[t - t_0 + \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)] \right]. \quad (16)$$

Изменение концентрации примесей в газопроводной системе определяется из равенства [4]:

$$c(t) = \frac{W_0 c_0 + c_{np} \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt}{W_0 c_0 + \int_{t_0}^t Q_{np}(t) dt} = \frac{W_0 c_0 + Q_{np}^0 \left[t - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)] \right] c_{np}}{W_0 + Q_{np}^0 \left[t - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)] \right]}. \quad (17)$$

С момента времени t с началом подачи газа за счет механического перемешивания концентрация примесей в газопроводе начинает уменьшаться, а в момент $t = t^*$ достигается величина предельно допустимой концентрации. (ПДК) c^* для которой удовлетворяется неравенство $c_{np} < c^* < c_0$. Здесь c_{np} – концентрация примесей подаваемого газа, c_0 – концентрация примесей в газопроводе в момент начала подачи газа. В соответствии с поставленной задачей возникает необходимость время регулирования t^* подачи газа до достижения концентрации примесей в газопроводе до величины ПДК – c^* , для чего зависимость (17) переписываем в виде [7, 8, 9]:

$$c^* = c(t^*) = \frac{W_0 c_0 + Q_{np}^0 \left[t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)] \right] c_{np}}{W_0 + Q_{np}^0 \left[t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(\lambda t) + \exp(-\lambda t_0)] \right]}. \quad (18)$$

Откуда получим нелинейные уравнения в виде:

$$t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t_0) [\exp[-\lambda(t^* - t_0)] - 1] = \frac{W_0}{Q_{np}^0} \cdot \frac{c^* - c_{np}}{c_0 - c^*}. \quad (19)$$

если безразмерные параметры $\lambda t_0 < \lambda t_0 < 1$, то, разлагая в ряд (19), получим уравнение:

$$t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} \left[1 - \lambda \frac{t^* - t_0}{1} + \frac{\lambda^2 (t^* - t_0)^2}{2} - \frac{\lambda^3 (t^* - t_0)^3}{6} + \dots - 1 \right] \exp(\lambda t_0) = \frac{W_0}{Q_{np}^0} \cdot \frac{c^* - c_{np}}{c_0 - c^*} \quad (20)$$

или

$$\frac{\lambda^2 (t^* - t_0)^2}{2} - \frac{\lambda^3 (t^* - t_0)^3}{6} = \frac{W_0}{Q_{np}^0} \cdot \frac{c^* - c_{np}}{c_0 - c^*}. \quad (21)$$

Пренебрегая последним слагаемым, получим [9]:

$$t^* = t_0 + \sqrt{\frac{W_0}{Q_{np}^0 \lambda^2} \cdot \frac{c^* - c_{np}}{c_0 - c^*}}. \quad (22)$$

Для определения времени достижения ПДК – t^* в газопроводе с длиной $x(t)$ при $Q_{np}(t) = \frac{\pi d_{ex}^2}{4} \cdot V(t)$, где скорость распространения газа по длине газопровода – $\frac{dx}{dt} = V(t)$, используем выражение для траектории движения струи потока газа:

$$x(t) = \frac{Q_{np}^0 \cdot 4}{\pi d_{ex}^2} \left[\int_{t_0}^t [1 - \exp(-\lambda t)] dt \right], \quad (23)$$

где d_{ex} – диаметр выходного сечения регулятора, с помощью которой регулируется приток газа. Вычисляя в (23) интеграл, получим [9, 10]:

$$x(t) = \frac{4Q_{np}^0}{\pi d_{ex}^2} \left\{ t - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda t_0)] \right\}. \quad (24)$$

Принимая $t = t_0, x(t_0) = 0, t = t^*, x(t^*) = L, L$ – длина газовой трубы, в которой концентрация примесей достигает ПДК.

Тогда получим уравнение для определения времени:

$$t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} [\exp(-\lambda t^*) - \exp(-\lambda t_0)] = \frac{\pi L d_{ex}^2}{4 Q_{np}^0}, \quad (25)$$

где D – диаметр трубы $W_0 = \frac{\pi D^2 L}{4}$.

(25) зависимость переписываем в виде:

$$t^* - t_0 + \frac{1}{\lambda} \left[-\lambda(t^* - t_0) + \frac{\lambda^2}{2}(t^{*2} - t_0^2) - \frac{(t^{*3} - t_0^3)}{6} \lambda^3 \right] = \frac{d_{ex}^2}{D^2} \cdot \frac{W_0}{Q_{np}^0}. \quad (26)$$

Считая $\lambda(t - t_0)$ малыми слагаемыми кубической степени, считаем малым из (26) получим:

$$\frac{\lambda}{2}(t^{*2} - t_0^2) = \frac{d_{ex}^2}{D^2} \cdot \frac{W_0}{Q_{np}^0}. \quad (27)$$

Решением уравнения (27) будет:

$$t^* = t_0 + \sqrt{\frac{W_0}{Q_{np}^0} \frac{d_{ex}^2}{\lambda D^2}} = t_0 + \frac{W_0}{Q_{np}^0} \frac{d_{ex}^2}{D^2}. \quad (28)$$

При необходимости учета кубическим слагаемым надо решить кубическое уравнение по формуле Кардана [11].

Результаты и их обсуждение. Для оценки точности и справедливости вычислений проведен расчет при наполнении одинаковых (похожих) участков газовой сети, с одинаковыми стартовыми условиями и различным шагом расчета сети, как показано на рисунке 1. По данным графикам видно, изменение давления газового потока в трубопроводе на каждые 200 м пути и 50 м пути. Полученные результаты не сильно отличаются друг от друга, что говорит о достаточной точности решений и их устойчивости.

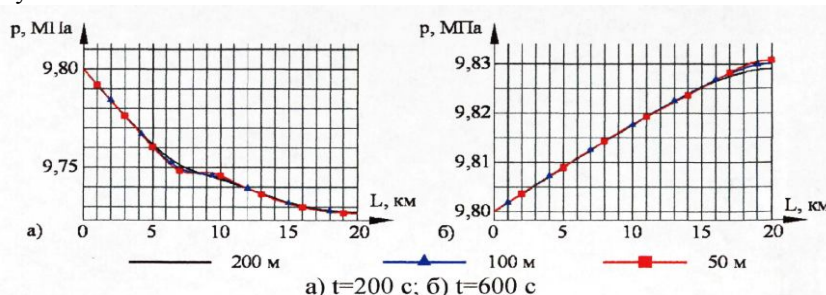


Рисунок 1 – Результаты расчетов давления газа в магистральном газопроводе при различных размерах шага пути

Для дальнейших вычислений установим шаг 200 м. На рисунке 2 показаны кривые, отображающие давление газового потока в различные временные периоды для участка газовой сети, не превышающей длину 20 км. Основные параметры газовой сети: внешний диаметр трубопровода $D_{TP} = 1420$ мм, толщин стенки трубопровода $\delta = 25$ мм. Задан коммерческий расход газа при стационарном режиме $Q_{КОМ} = 160$ млн кубов в сутки. В начале участка сети устанавливается

постоянное давление $p_{нач} = 9,8$ МПа. Газ имеет температура в пределах $T_{нач} = 35^\circ$. Внешняя температура $T_{окр} = 10^\circ$. Построенные графики в соответствии с решением показали, как плавно происходит процесс перехода между режимами в газопроводной сети, так давление газа плавно, без резких скачков достигает равновесных значений. Данная тенденция сохраняется в любом месте газопроводной сети.

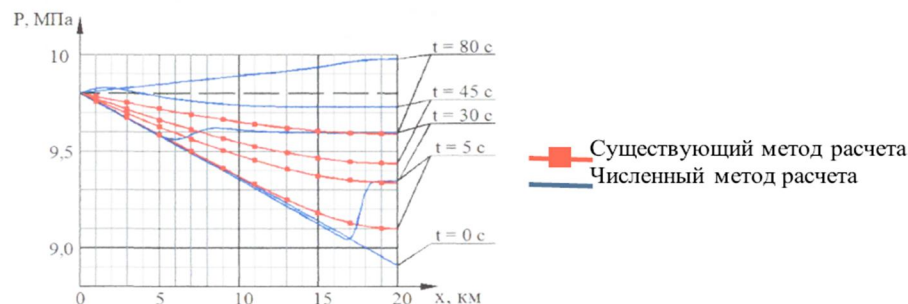


Рисунок 2 – Изменение давления газа на участках сети

Как видно из рисунка, при перекрытии газопровода на 5-той секунде наблюдается рост давления. При расчетах по установленным методам такого роста нет, так как они не учитывают наличие сил инерции в газопроводе. Предложенные методы показывают на то, что увеличение давления на любом рассматриваемом участке газопровода не перестанет и после получения равновесной для вновь установившегося стационарного режима, как показано на рисунке 4. Данный факт доказывает присутствие у газа в газопроводе достаточно значительной инерции.

Также часть газового потока, движущегося в одном направлении, может сталкиваться с другой частью потока, которая может двигаться на встречном направлении, так проявляется аккумуляющая способность газопровода. При этом поток тормозится, и возникает новая волна давления. Полученное возмущение далее по длине газопровода начнет уменьшаться из-за рассеивания энергии газового потока. Максимальное давление потока примерно = 10 МПа, достигается в конечном сечении участка газопровода через 80 секунд от начала нестационарного процесса на рисунке 3. Сравнивая существующий и предложенный методы расчета можно увидеть, что в предложенном численном решении колебательного движения газа в газопроводе, в существующих методах решения намного интенсивней происходит переход к стационарному режиму, примерно 250 секунд, предложенный метод 3000 секунды.

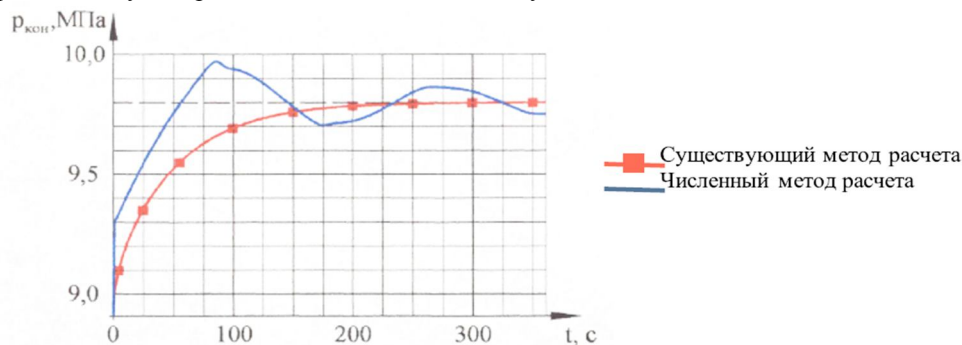


Рисунок 3 – Значения давления в конечном сечении газопровода $p_{кон}$

На первом этапе при заполнении газопровода, его давление, которое определяется при помощи предложенного метода характеристик, будет расти быстрее. Данный эффект объясняется волнами, тормозящими поток газа и наличием термических эффектов.

Заключение. В работе получены закономерности, с помощью которых можно установить динамику изменения концентрации примесей, изменения давления газа и времени распространения примесей по газовой сети системы газоснабжения.

На основе балансовых уравнений получены гидравлические зависимости для установления концентрации примесей по объему, изменения давления газа при остановке подачи и начало функционирования компрессорной станции, для создания необходимого напора в системе газоснабжения.

Полученные гидравлические закономерности способствовали созданию закономерностей для установления надежных характеристик систем газоснабжения, а также приемлемого состояния газа, подчиняющей различным законам регулирования подачи газа.

Библиографический список

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев // Энергия. –1970. – 672 с.
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – 5-е изд. – Москва : Наука, 1994. – Т. 1. – 529 с.
3. Юрков Н. К. Уточненный алгоритм расчета гидродинамических параметров инженерных газовых сетей / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Промышленная энергетика. – 2017. – № 2. – С. 44–47.
4. Петров А. Г. Перенос взвешенных частиц турбулентным потоком над размывным дном / А. Г. Петров, П. Г. Петров // Журнал ПМТФ. – 1992.
5. Юрков Н. К. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Надежность и качество сложных систем : труды международного симпозиума. – 2016. – № 1. – С. 163–165.
6. Селезнев В. Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов. Методы, модели и алгоритмы / В. Е. Селезнев, В. В. Алешин, С. Н. Прялов. – Москва : МаксПресс, 2007.
7. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1977.
8. Davis R. L. Prediction of compressible laminar viscous flows using a time-marching control volume and multi-control and multiple-grid techniques / R. L. Davis, W. Bowley // AIAA Journal. – 1984. – Vol. 22, № 11. – P. 1573–1581.
9. Hujaev I. K. Carrying and heat-sink abilities of the linear site of the gas main in the stationary mode of functioning / I. K. Hujaev, R. Sadullaev, O. S. Bozorov // Proceeding of the its seminar among KALM, Tashkent State Technical University and Ustoz Republican Foundation. Tashkent, July 3–5, 2003. – 2003. – P. 157–160.
10. Johnson C. R. Lectures on adaptive parameter estimation. Englewood Cliffs / C. R. Johnson. – New Jersey : Prentice Hall, 1998. – 160 p.
11. Walter E. Identification of parametric models from experimental data / E. Walter, L. Pronzato. – London : Spriger, 1997. – 413 p.

References

1. Chugaev R. R. Gidravlika [Hydraulics]. *Energiya* [Energy], 1970. 672 p.
2. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Continuum mechanics]. 5th ed. Moscow, Science Publ., 1994, vol. 1. 529 p.
3. Yurkov N. K., Shtykov R. A. Utochnennyy algoritim rascheta gidrodinamicheskikh parametrov inzhenernykh gazovykh setey [Refined algorithm for calculating the hydrodynamic parameters of engineering gas networks]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2017, no. 2, pp. 44–47.
4. Petrov A. G., Petrov P. G. Perenos vzveshennykh chastits turbulentnym potokom nad razmyvnyy dnom [Transport of suspended particles by a turbulent flow over the washout bottom]. *Zhurnal PMTF* [Journal of the PMTF], 1992.
5. Yurkov N. K., Shtykov R. A. Yedinoe komponentnoye uravneniye dlya slozhnosostavnogo goryuchego gaza [Unified Component Equation for Composite Combustible Gas]. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality of complex systems : proceedings of the International symposium], 2016, no. 1, pp.163–165.
6. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Pryalov S. N. Matematicheskoye modelirovaniye truboprovodnykh setey i sistem kanalov [Mathematical modeling of pipeline networks and channel systems]. *Metody, modeli i algoritmy* [Methods, models and algorithms]. Moscow, MaksPress Publ., 2007.
7. Tixonov A. N., Samarskiy A. A. *Uraveniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977.
8. Davis R. L., Bowley W. Prediction of compressible laminar viscous flows using a time-marching control volume and multi-control and multiple-grid techniques. *AIAA Journal*, 1984, vol. 22, no. 11, pp. 1573–1581.
9. Hujaev I. K., Sadullaev R., Bozorov O. S. Carrying and heat-sink abilities of the linear site of the gas main in the stationary mode of functioning. *Proceeding of the its seminar among KALM, Tashkent State Technical University and Ustoz Republican Foundation, Tashkent, July 3–5, 2003*, 2003, pp. 157–160.
10. Johnson C. R. *Lectures on adaptive parameter estimation*. Englewood Cliffs. New Jersey, Prentice Hall, 1998. 160 p.
11. Walter E., Pronzato L. *Identification of parametric models from experimental data*. London, Spriger, 1997. 413 p.

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.106-112
УДК 551.46.077

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАТЕРНИОНОВ

Статья поступила в редакцию 12.02.2021, в окончательном варианте – 26.04.2021.

Гаврилина Екатерина Андреевна, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1, ассистент, ORCID 0000-0002-9919-5287, e-mail: ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Вельтищев Вадим Викторович, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1, доктор технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-6245-839X, e-mail: vvv@bmstu.ru

Традиционно необитаемые подводные аппараты эксплуатируют при малых углах наклона (дифферента и крена). Однако появляются задачи, требующие высокой маневренности и управляемости подводного аппарата во всем диапазоне углов ориентации. В то же время традиционные системы управления используют углы Эйлера – Крылова и имеют ограничения, связанные с вырождением кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$, неоднозначностью углов Эйлера – Крылова и ухудшением качества работы системы при больших наклонах НПА по дифференту и крену. Таким образом, остро встает вопрос разработки методики синтеза системы управления высокоманевренными необитаемыми подводными аппаратами. В работе проводится обзор и сравнительный анализ существующих подходов к управлению ориентацией, на основании которого выбран подход с использованием кватернионов. Закон управления ориентацией на основе кватернионов, апробирован в ходе натурных испытаний на гибридном необитаемом подводном аппарате «Износ», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты, полученные в ходе испытаний, приводятся в статье. Подход на основе кватернионов имеет простую структуру, лучшие показатели качества переходных процессов в сравнении с традиционной системой управления и может быть использован для повышения маневренности необитаемых подводных аппаратов со средними требованиями к точности позиционирования.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, автономный необитаемый подводный аппарат, высокая маневренность, система управления, кватернион, система управления ориентацией

QUATERNION-BASED ATTITUDE CONTROL OF HIGHLY MANEUVERABLE UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

The article was received by the editorial board on 12.02.2021, in the final version – 26.04.2021.

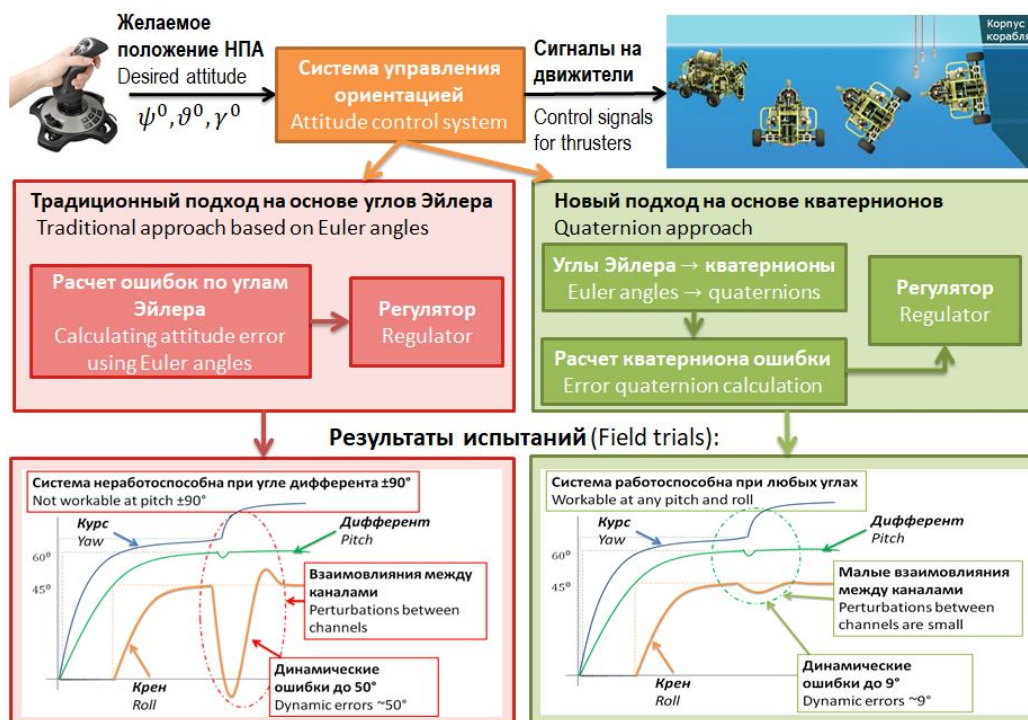
Gavrilina Ekaterina A., Moscow State Technical University N.E. Bauman, 2nd Baumanskaya St., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, assistant, ORCID 0000-0002-9919-5287, e-mail: ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Veltishev Vadim V., Moscow State Technical University N.E. Bauman, 2nd Baumanskaya St., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering) Associate Professor, ORCID 0000-0001-6245-839X e-mail: vvv@bmstu.ru

Traditionally, unmanned underwater vehicles are operated at low angles of inclination (pitch and roll). However, there are tasks that require high maneuverability and controllability of the underwater vehicle in the entire range of orientation angles. At the same time, traditional control systems use the Euler angles and have limitations associated with the degeneration of the kinematic equations at a pitch angle of $\pm 90^\circ$, the problem of the non-uniqueness of the Euler angles, and the deterioration of the system performance at large inclinations of the vehicle. Thus, the question of developing a synthesis method for a control system for highly maneuverable unmanned underwater vehicles arises. The paper provides a review and comparative analysis of existing approaches to attitude control, on the basis of which an approach using quaternions is chosen. The law of attitude control based on quaternions was approved during field tests on a hybrid unmanned underwater vehicle "Iznos", developed at Bauman Moscow State Technical University. The results obtained during the tests are given in the article. The quaternion-based approach has better performance in comparison with the traditional control system. In addition, control system based on quaternion approach has a simple structure and can be used to increase the maneuverability of unmanned underwater vehicles with average requirements for positioning accuracy.

Keywords: remotely operated vehicle, autonomous underwater vehicle, high maneuverability, control system, quaternion, attitude control system

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящее время необитаемые подводные аппараты (НПА) активно используются для проведения военных, инженерных и исследовательских подводных работ. Традиционно НПА эксплуатируются при близких к нулю значениях углов наклона (дифферента) и крена и не имеют жестких требований к системе управления (СУ) при больших наклонах [1]. Однако существуют задачи, для которых требуется работоспособность НПА во всем диапазоне углов ориентации. К таким задачам относятся: осмотр и идентификация миноподобных объектов, маневрирование и осмотр в условиях ограниченного пространства, обследование тоннелей системы охлаждения ядерных реакторов, осмотр корпусов судов, гребных винтов, надводных конструкций и т.п.

Несмотря на актуальность режимов движения НПА при больших углах дифферента и крена и существование аппаратов, которые их поддерживают (SEA WASP, Sea Owl, V8 SII, MARES [2]), методики построения СУ НПА, работоспособных во всем диапазоне углов ориентации проработаны недостаточно.

При этом традиционные подходы к построению СУ ориентацией НПА предполагают использование углов Эйлера – Крылова (курса, дифферента и крена) и исследованы для режимов движения при малых углах наклона, при этом они имеют ряд особенностей и ограничений при работе на больших углах:

1. Вырождение кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$ [3];
2. Неоднозначность определения углов ориентации при угле дифферента $\pm 90^\circ$;
3. Увеличение взаимовлияния между каналами управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов наклона и, как следствие, ухудшение процессов в СУ [4, 5];
4. Изменение параметров отдельных каналов управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов дифферента и крена, что приводит к ухудшению процессов в СУ и ограничению допустимых углов наклона, при которых СУ работоспособна [4, 5].

Таким образом, остро встает вопрос разработки методики построения СУ высокоманевренным НПА. Для решения поставленной задачи в работе проводится обзор существующих подходов к построению СУ ориентацией, нацеленный на выбор наиболее перспективного. Выбранный подход апробирован в ходе натурных экспериментов на НПА «Износ» [6], разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В статье приведены результаты, полученные в ходе натурных экспериментов, а также сравнение качества работы традиционной системы и системы, основанной на кватернионах.

Обзор и сравнительный анализ подходов к построению СУ ориентацией НПА. Вопрос разработки системы управления ориентацией без ограничений на углы наклона достаточно проработан для космических, летательных аппаратов и торпед. На основе проведенного анализа можно выделить подходы к проектированию СУ ориентацией на основе: кватернионов [7, 8, 9]

матриц направляющих косинусов [10], вектора конечного поворота [11], классических [12] и модифицированных параметров Родрига [13]. Для выбора подхода для дальнейшего исследования сравним перечисленные параметры по следующим критериям: количество параметров, описывающих ориентацию, наличие проблем неоднозначности описания ориентации и вырождения кинематических уравнений. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение кинематических параметров

Кинематические параметры	Количество параметров	Неоднозначность описания ориентации	Вырождение кинематических уравнений
Углы Эйлера	3	Да	Да
Направляющие косинусы	9	Нет	Нет
Вектор конечного поворота	4	Да	Да
Кватернионы	4	Да	Нет
Классические параметры Родрига	3	Да	Да
Модифицированные параметры Родрига	3	Да	Да

По результатам, представленным в таблице, матрицы направляющих косинусов являются единственными кинематическими параметрами, которые не имеют проблемы неоднозначности описания ориентации и вырождения кинематических уравнений. Однако для описания ориентации с использованием таких матриц используется 9 параметров, которые имеют 6 уравнений связи, что значительно усложняет процесс интегрирования кинематических уравнений.

В то же время кватернионам не свойственна проблема вырождения кинематических уравнений, для описания ориентации используется 4 параметра, которые связаны одним уравнением. Кроме того, для кватернионов уже разработаны способы обхода проблемы неоднозначности описания ориентации [8].

Системы координат и модель кинематики НПА. Пространственное движение НПА рассматриваем как суперпозицию поступательного движения его полюса и вращательного движения вокруг полюса. В рамках данной работы рассматривается только вращательное движение НПА, которое задается тремя последовательными поворотами системы координат $Oxuz$, связанной с НПА, на углы ψ курса, ϑ дифферента и γ крена относительно базовой системы координат $Ox_gy_gz_g$ полусвязанной с НПА.

Система координат $Ox_gy_gz_g$ задана следующим образом: вершина O совмещена с центром масс НПА (полюсом), ось Ox_g направлена на Север по касательной к меридиану, Oz_g – по касательной к параллели на Восток, ось Oy_g – вдоль вертикали места вверх. Полюс связанной с НПА системы координат $Oxuz$, также как и $Ox_gy_gz_g$, совпадает с центром масс НПА, ось Ox направлена вдоль продольной оси в носовую часть аппарата, ось Oy лежит в диаметральной плоскости НПА и направлена вверх, ось Oz направлена на правый борт.

В соответствии с теоремой Эйлера ориентацию НПА можно также задать как поворот вокруг единичной оси конечного поворота \vec{e} на угол конечного поворота χ . Поясняющая схема представлена на рисунке 1.

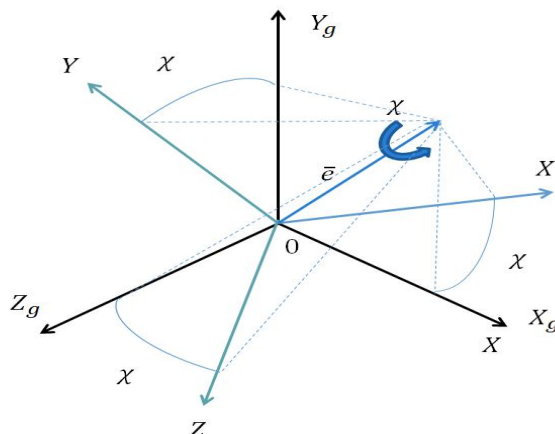


Рисунок 1 – Описание ориентации НПА с помощью угла и вектор конечного поворота

В соответствии с этой теоремой ориентация НПА в пространстве может быть представлена с помощью нормированного кватерниона, компонентами которого являются параметры Родрига – Гамильтона:

$$\Lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T = \left[\cos \frac{\chi}{2} \cos \bar{\alpha} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\beta} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\gamma} \sin \frac{\chi}{2} \right]^T, \quad (1)$$

где χ – угол поворота вокруг оси конечного поворота, а $\cos \bar{\alpha}$, $\cos \bar{\beta}$, $\cos \bar{\gamma}$ – направляющие косинусы между вектором \bar{e} и осями Ox , Oy и Oz соответственно.

При этом компоненты кватерниона связаны между собой условием нормировки:

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1. \quad (2)$$

Параметры кватерниона можно вычислить, используя углы Эйлера – Крылова. Уравнение связи между параметрами имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_1 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_2 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_3 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кинематические уравнения, используемые для получения текущей ориентации НПА в кватернионах, имеют вид:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \Omega, \quad (4)$$

где Λ – нормированный кватернион, задающий текущее положение СК Ox_yz относительно полу-связанной СК $Ox_g y_g z_g$ (1), а Ω – кватернионное представление угловой скорости НПА:

$$\Omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T. \quad (5)$$

В начальный момент времени интегрирования компоненты кватерниона рассчитываются из начальных значений углов курса, дифферента и крена в соответствии с уравнениями (3).

Управление ориентацией с использованием кватернионов. Структурная схема системы управления ориентацией, основанной на кватернионах, приведена на рисунке 2.

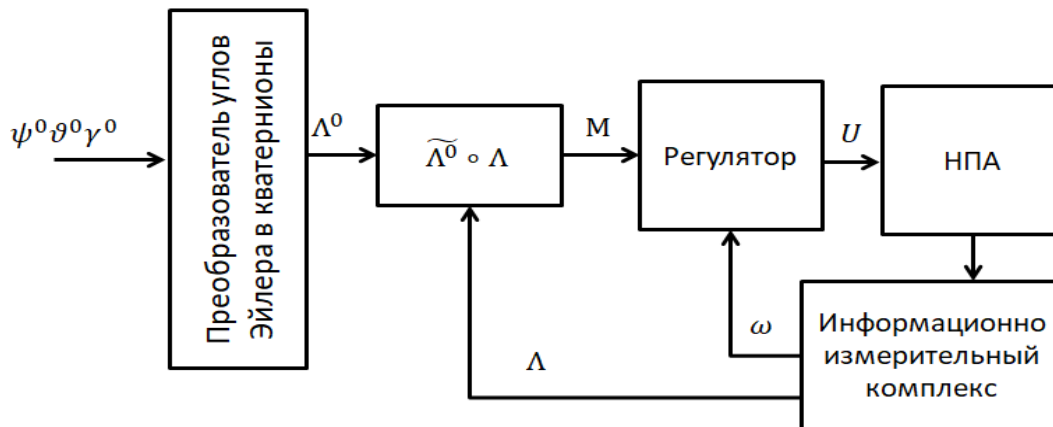


Рисунок 2 – Схема системы управления ориентацией НПА

Оператор задает желаемое положение НПА с помощью углов курса ψ^0 , дифферента ϑ^0 и крена γ^0 . Данные углы поступают в блок преобразователя углов Эйлера в кватернионы, где в соответствии с уравнениями (3) рассчитывается кватернион желаемого положения Λ^0 . При этом кватернион, который описывает текущую ориентацию НПА, рассчитывается в информационно-измерительном комплексе НПА на основе измерений текущей угловой скорости ω НПА и интегрирования кинематических уравнений (4).

Кватернион, который описывает ошибку ориентации, рассчитывается следующим образом:

$$M = [\mu_0 \ \mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3]^T = \tilde{\Lambda}^0 \circ \Lambda, \quad (6)$$

где $\tilde{\Lambda}^0$ – кватернион, сопряженный Λ^0 .

Рассчитанное значение ошибки ориентации поступает в регулятор СУ, при этом закон управления имеет вид:

$$U_i = -\text{sign}(\mu_0)K_i\mu_j + \int K_{int\ i}\mu_j dt - K_{di}\omega_i, \text{ где } i = x, y, z, a j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где $K_x, K_y, K_z, K_{int\ x}, K_{int\ y}, K_{int\ z}, K_{dx}, K_{dy}, K_{dz}$ – коэффициенты СУ, выбранные исходя из требований устойчивости и качества сепаратных каналов управления креном, курсом и дифферентом соответственно; а компонент $\text{sign}(\mu_0)$ позволяет избежать проблемы неоднозначности описания ориентации, свойственной кватернионам.

Результаты экспериментов. Алгоритм управления ориентацией НПА был проверены в ходе натуральных испытаний НПА Износ, разработанного в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. НПА «Износ» предназначен для дефектоскопии корпусов судов и подводных объектов и имеет гибридный движительный комплекс [6]. Внешний вид НПА представлен на рисунке 3 (а). Движительный комплекс включает в свой состав 8 винтомоторных агрегатов и шасси с колесами. Винтомоторные агрегаты используются для управления НПА в воде, а также позволяют «прижать» НПА к рабочей поверхности. Дальнейшее управление движением НПА по поверхности осуществляется с помощью колес. В процессе стыковки НПА должен принимать положение с большими углами крена и дифферента, как это показано на рисунке 3 (б).

Информационно-измерительный комплекс включает в свой состав 3 волоконно-оптических гироскопа, магнитометр и три акселерометра, объединенных в бесплатформенную систему ориентации, которая вычисляет текущее положение НПА в углах Эйлера-Крылова и кватернионах.

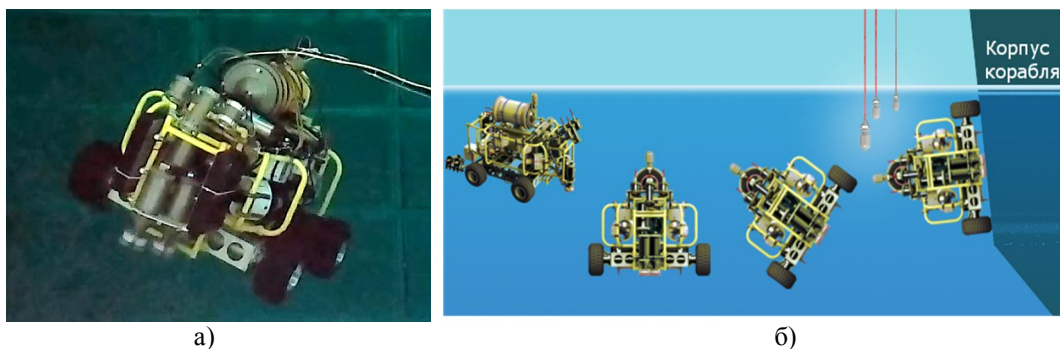


Рисунок 3 – НПА «Износ» в ходе испытаний в бассейне (а), схема выполнения стыковки с корпусом судна (б)

Исследование работы СУ проводилось следующим образом. На начальном этапе проводилась настройка СУ сепаратными каналами управления курсом, дифферентом и креном. Параметры регулятора были подобраны таким образом, чтобы перегулирование в каналах управления курсом, дифферентом и креном не превышало 5 % как для малых, так и для больших задающих значений.

На следующем этапе проводилось исследование совместной работы каналов управления ориентацией при различных углах крена и дифферента. СУ задавалось значение дифферента более 45° , по завершении переходного процесса, в контуре дифферента происходило управление НПА по курсу или крену. Аналогично совместная работа контуров проверялась при заданных углах крена и дифферента порядка 45° .

Процесс настройки и проверки совместной работы контуров на НПА «Износ» был проверен для традиционного подхода к управлению ориентацией, приведенного в работах [1, 4] и для подхода с использованием кватернионов. Вид переходных процессов в СУ с кватернионами приведен на рисунке 4 (а), а для традиционного подхода на рисунке 4 (б). Параметры переходных процессов для различных подходов приведены в таблице 2.

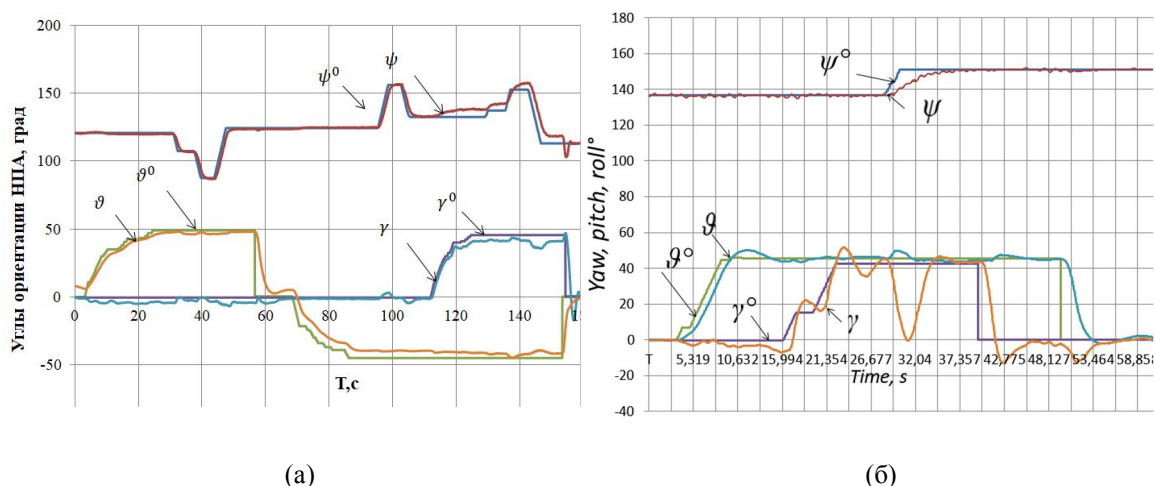


Рисунок 4 – Переходные процесс в СУ, основанной на кватернионах (а), основанной на углах Эйлера – Крылова (б)

Таблица 2 – Сравнение подходов

Подход к построению системы управления	Время переходного процесса			Перерегулирование			Динамические ошибки	
	$t_{п.п.\psi}$: с	$t_{п.п.\theta}$: с	$t_{п.п.\gamma}$: с	$\sigma_{i\psi}$: %	$\sigma_{i\theta}$: %	$\sigma_{i\gamma}$: %	$\Delta_{дин\theta}$, °	$\Delta_{дин\gamma}$, °
На основе кватернионов	5	8	8	2	–	–	4	9
Традиционная система на основе углов Эйлера – Крылова	9	9	18	5	0	20	8	45

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что подход с использованием кватернионов имеет достаточное быстродействие и меньшее взаимовлияние между каналами в сравнении с традиционным подходом к построению системы управления на основе углов Эйлера. Кроме того, для данного подхода отсутствует проблема вырождения кинематических уравнений, и неоднозначности определения ориентации НПА при каких-либо углах ориентации по сравнению с традиционными подходами. Подход является перспективным для высокоманевренных НПА со средними требованиями к точности позиционирования.

Библиографический список

1. Костенко В. В. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» / В. В. Костенко Д. Н. Михайлов // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – Т. 1, № 13. – С. 36–46.
2. Ferreira B. M. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down / B. M. Ferreira, J. Jouffroy // Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE. – 2012. – С. 1–7.
3. Матвеев В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
4. Лямина Е. А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона / Е. А. Лямина, С. А. Егоров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – Вып. 3. – С. 351–356.
5. Gavrilina E. A. A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles / E .A. Gavrilina, V. N. Chestnov, A. N. Kropotov // 2019 18th European Control Conference (ECC). Naples, Italy, 2019. – С. 3334–3339.
6. Вельтищев В. В. Роботизированная технология освидетельствования подводной части судна / В. В. Вельтищев и др. // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 1 (21). – С. 15–24.
7. Грумондз В. Т., Половинкин В. В. Теория движения двусредных аппаратов. Математические модели и методы исследования / В. В. Половинкин, В. Т. Грумондз. – Москва : Вузовская книга, 2012. – 644 с.
8. Челноков Ю. Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением / Ю. Н. Челноков. – Москва : Физматлит, 2011.
9. Лямина Е. А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона / Е. А. Лямина // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Спецвыпуск 1. – С. 224–234.

10. Chaturvedi N. A., Asymptotic smooth stabilization of the inverted 3-D pendulum / N. A. Chaturvedi, N. H. McClamroch // *IEEE Transactions Automatic Control*. – 2009. – № 6 (54). – C. 1204–1215.
11. Ozgoren M. K. Comparative study of attitude control methods based on Euler angles, quaternions, angle-axis pairs and orientation matrices / M. K. Ozgoren // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2019. – Vol. 41, iss. 5. – P. 1189–1206.
12. Tsiotras P. New control laws for the attitude stabilization of rigid bodies / P. Tsiotras // *Automatic Control in Aerospace 1994 (Aerospace Control '94)*. – 1995. – P. 321–326.
13. Binette M. R. Nonlinear H_∞ Attitude Control Using Modified Rodrigues / M. R. Binette et al. // *Parameters Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2014. – № 37 (6). – P. 2017–2021.

References

1. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. *Razrabotka teleupravlyayemogo podvodnogo apparata «MAKS-300»* [Development of the remotely operated underwater vehicle «MAKS-300»]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater exploration and robotics], 2012, vol. 1, no. 13, pp. 36–46.
2. Ferreira B. M., Jouffroy J. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down. *Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE*, 2012, pp.1–7.
3. Matveev V. V., Raspopov V. Ya. *Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertsiykh navigatsionnykh sistem* [Fundamentals of building strapdown inertial navigation systems]. Saint Petersburg, SSC RF JSC «Concern “TsNII Elektropribor”», 2009. 280 p.
4. Lyamina E. A., Egorov S. A. Osobennosti postroyeniya sistemy upravleniya uglovoy oriyentatsiyey podvodnogo apparata dlya bolshikh uglov naklona [Features of constructing a control system for underwater vehicle angular orientation at large angles of inclination]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 3, pp. 351–356.
5. Gavrilina E. A., Chestnov V. N., Kropotov A. N., A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles. *2019 18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, 2019, pp. 3334–3339.
6. Veltishchev V.V. et al. Robotizirovannaya tekhnologiya osvidetelstvovaniya podvodnoy chasti sudna [Robotic technology for survey of the underwater part of the vessel]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater exploration and robotics], 2016, no. 1 (21), pp. 15–24.
7. Grumondz V. T., Polovinkin V. V. *Teoriya dvizheniya dvusrednykh apparatov. Matematicheskiye modeli i metody issledovaniya* [Theory of motion of two-averaged vehicles. Mathematical models and research methods]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2012. 644 p.
8. Chelnokov Yu. N. *Kvaternionnyye modeli i metody dinamiki, navigatsii i upravleniya dvizheniyem* [Quaternion models and methods applied to dynamics, navigation and motion control]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011.
9. Lyamina E. A. Podkhody k postroyeniyu sistemy upravleniya uglovym polozheniyem neobitayemogo podvodnogo apparata bez ogranicheniy na ugly naklona [Approaches to angular position control system for underwater vehicle without tilt angle constraints]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2018, special issue 1, pp. 224–234.
10. Chaturvedi N. A., McClamroch N. H. Asymptotic smooth stabilization of the inverted 3-D pendulum. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2009, no. 6 (54), pp. 1204–1215.
11. Ozgoren M. K. Comparative study of attitude control methods based on Euler angles, quaternions, angle-axis pairs and orientation matrices. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, vol. 41, iss. 5, pp. 1189–1206.
12. Tsiotras P. New control laws for the attitude stabilization of rigid bodies. *Automatic Control in Aerospace 1994 (Aerospace Control '94)*, 1995, pp. 321–326.
13. Binette M. R. et al. Nonlinear H_∞ Attitude Control Using Modified Rodrigues. *Parameters Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, no. 37 (6), pp. 2017–2021.

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.113-125
УДК 004.001

СИСТЕМА 3D-ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ¹

Статья поступила в редакцию 06.05.2021, в окончательном варианте – 18.05.2021.

Кабанов Алексей Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-3105-7283, e-mail: kabanov@sevsu.ru
Крамарь Вадим Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-0528-1978, e-mail: vakramar@sevsu.ru
Крамарь Олег Александрович, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, младший научный сотрудник, ORCID 0000-0001-6215-5591, e-mail: vakramar@sevsu.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки комплексной системы 3D-зрения высокого разрешения для удаленно управляемых и автономных подводных робототехнических комплексов (РТК). Приведена задача разработки системы 3D-зрения как сенсорной подсистемы подводного робота. Типичными примерами задач, решаемых с помощью РТК данного класса, являются поиск и обследование подводных объектов, мониторинг окружающей среды, выполнение манипуляционных действий с объектами интереса и др. Представлена структура комплексной системы 3D-зрения. Приведено описание конструкции основных структурных элементов системы, описан основной функционал разработанного тестового программного обеспечения. Приведены технические характеристики подсистем, таких как модуль ближнего обзора системы 3D-зрения, модуль дополнительного освещения, модуль дальнего обзора. Приведено описание разработанного программного обеспечения обработки видеоданных стереокамеры (стереомодуля) в реальном времени. В работе приведены результаты тестовой апробации программного обеспечения, реализующего ряд алгоритмов 3D-реконструкции рабочего пространства подводного робота по информации, поступающей с модуля стереозрения. Апробация проводилась на действующем макете подводного модуля стереозрения соединенного с разработанным подводным роботом. Исследование характеристик комплексной системы 3D-зрения, выполнялось в аквариуме и бассейне. Проведенные эксперименты показали эффективность разработанной системы при ее совместном использовании с подводным роботом.

Ключевые слова: система технического зрения, подводный робототехнический комплекс, стереозрение, сенсорная подсистема

3D VISION SYSTEM FOR UNDERWATER ROBOT

The article was received by the editorial board on 06.05.2021, in the final version – 18.05.2021.

Kabanov Aleksey A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID 0000-0002-3105-7283, e-mail: kabanov@sevsu.ru
Kramar Vadim A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), professor, ORCID 0000-0002-0528-1978, e-mail: vakramar@sevsu.ru
Kramar Oleg A., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, junior researcher, e-mail: vakramar@sevsu.ru

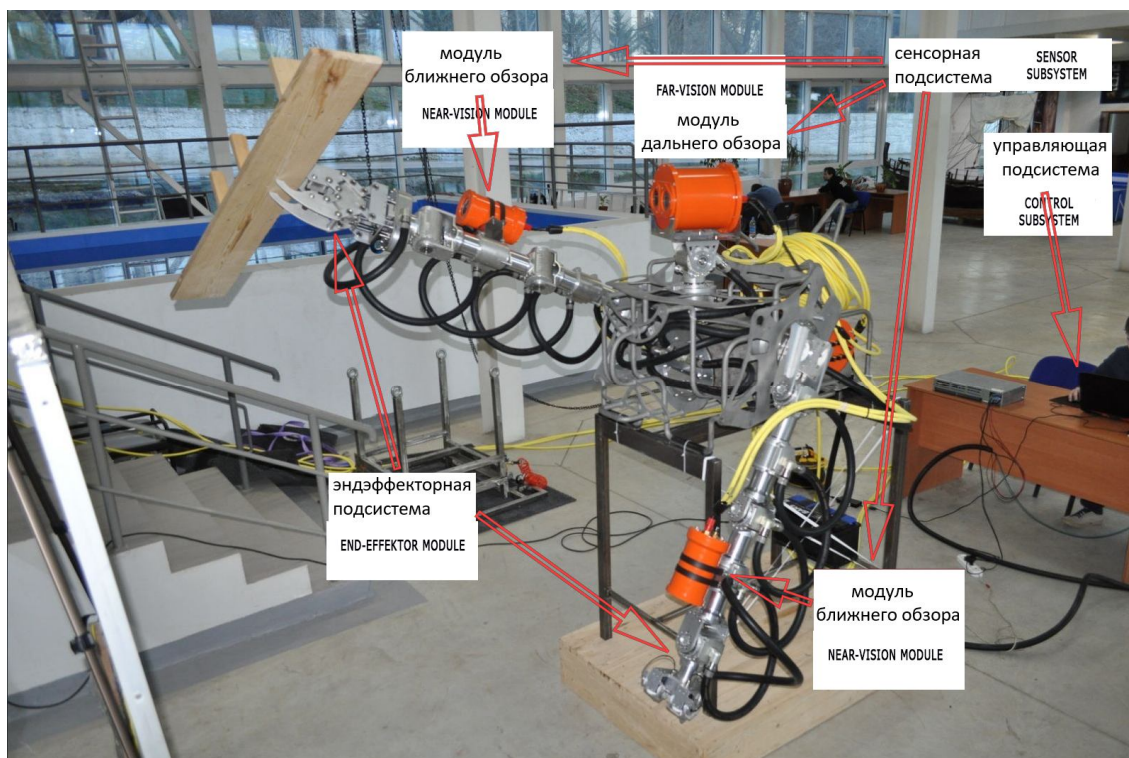
The article deals with the development of an integrated high-resolution 3D vision system for remotely controlled and autonomous underwater robotic systems. The problem of developing a 3D vision system as a sensor subsystem of an underwater robot is presented. Typical examples of tasks solved with the help of such robotic systems are environmental monitoring; detection of objects and obstacles, their localization; convergence of the CRS with the object; performing operations with objects. The structure of a complex 3D vision system is presented. The description of the design of the main structural elements of the system is given, the main functionality of the developed test software is described. The technical characteristics of the subsystems are given, such as the module for the near-vision of the 3D vision system, the module for additional lighting, and the module for far vision. The description of the developed software for processing video data of a stereo camera (stereo module) in real-time is given. The paper

¹ Исследование частично выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного гранта № 18-48-920022 p_a.

presents the results of the test approbation of software that implements many algorithms for 3D reconstruction of the working space of an underwater robot based on information received from the stereo vision module. The approbation was carried out on the operating model of the underwater stereo vision module connected to the developed underwater robot. The study of the characteristics of a complex 3D vision system was carried out in an aquarium. The effectiveness of the developed system was shown by the experiments with the underwater robot.

Keywords: computer vision system, underwater robot, stereo vision, sensor subsystem

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Введение. Применение подводных роботов и робототехнических систем является устойчивым трендом последних лет. Подводные роботы являются частью обширного семейства промышленных роботов. Многозвенные манипуляторные комплексы подводного исполнения могут обеспечить выполнения широкого спектра манипуляционных работ. Например, манипуляторные роботы могут выполнять аккуратные действия и операции с тонкой моторикой, что особенно важно при работе с хрупкими или биологическими объектами [1]. Благодаря современным алгоритмам, построенным на базе технологий машинного обучения и искусственного интеллекта, подводные манипуляторные роботы могут выполнять операции, выполняемые, как правило, исключительно силами водолазов (хотя, как правило, для этого требуется четкое понимание сценария действия).

Среди множества приложений следует выделить два основных вида работ, которые могут быть выполнены подводными роботами с максимальной эффективностью. В первую очередь это работы исследовательского характера, направленные на решение проблем современной океанологии – сбор информации о физических параметрах водной среды (температура, соленость и прочие). Другая группа касается подводно-технических работ, таких как обслуживание донных станций и измерительных систем, обеспечение прокладки и регламентное обслуживание подводных кабелей и трубопроводов, участие в аварийно-спасательных операциях.

По данным MarketsandMarkets порядка 85 % операций, выполняемых подводными роботами, осуществляются в телеуправляемом режиме [2]. При этом необходимость работы в неструктурированном подводном окружении требует совершенствования систем управления подводных роботов в плане повышения их автономности и функциональности за счет технологий искусственного интеллекта. В этом направлении ведется множество работ различными исследователями, некоторые из которых представлены в [3–5].

Задача такого класса выполняется в настоящей работе, которая выполнена при реализации проекта по созданию подводного робототехнического комплекса, предназначенного для выполнения работ на малых глубинах. Внешний вид созданного экспериментального образца подводного робота показан на рисунке 1.

Предварительные исследования методов и алгоритмов управления [6, 7] производились с использованием антропоморфного манипуляторного робота SAR-400, являющегося прообразом и, по сути, первым прототипом, демонстрирующим технологии, реализованные в широко известном отечественном антропоморфном роботе FEDOR [8]. В [6] выполнен подробный обзор существующих подходов к построению манипуляторов различного типа, в том числе подводных [9–12]. В работах [13–16] описаны способы управления подводными роботами.

В целом подводный робот состоит из трех основных подсистем: сенсорной, исполнительной (эндэфекторной) и управляющей [1].

Сенсорная система подводного робота является «органом чувств», предназначенным для сбора информации о внешнем мире и работе комплекса. Благодаря этой системе у подводного робота в процессе взаимодействия с окружающей обстановкой создается внутренняя модель внешнего мира.

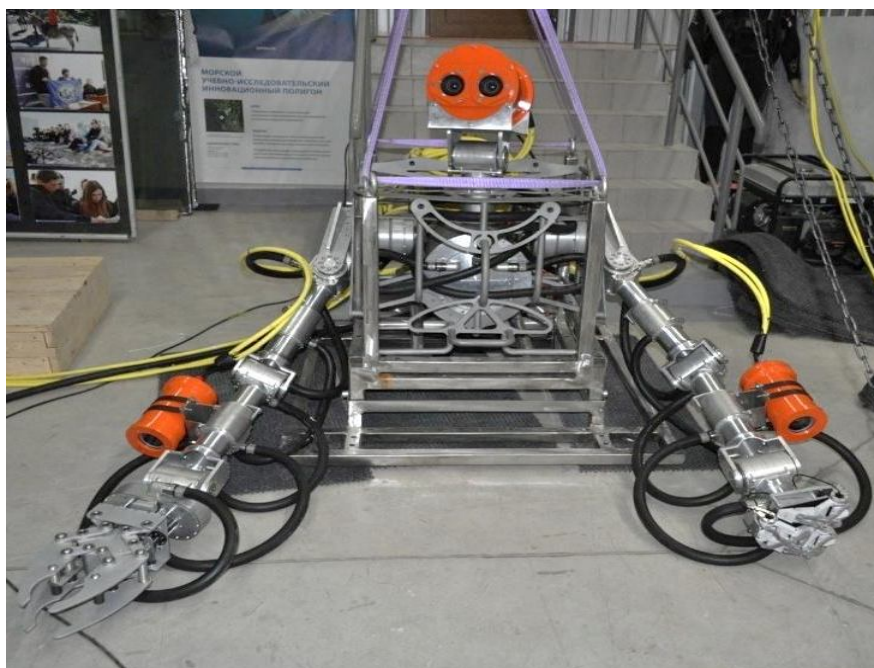


Рисунок 1 – Внешний вид разрабатываемого подводного робота

Наряду с разработкой, исполнительной и управляющей систем робота, одной из важнейших задач проектирования подводного РТК является задача разработки сенсорной системы в виде системы технического зрения. При использовании в качестве сенсорной системы – системы 3D-зрения необходимо разрабатывать новые алгоритмы, т.к. алгоритмы обработки изображений (в т.ч. стереозрения), применяемых в воздушной среде не всегда будут работоспособны в подводных условиях. Это связано с проблемой робастности алгоритмов. Большие теоретические исследования по разработке алгоритмов обработки изображений в системе 3D-зрения были выполнены в работе [17].

Разработка необходимых составляющих трех основных подсистем подводного робота ведет к достижению поставленной цели и позволит в будущем перейти к проведению исследований в области совершенствования методов комплексирования информации об окружающей обстановке и методов управления движениями РТК.

В работе приводится описание структуры и функционала системы 3D-зрения разработанного подводного РТК. Описаны основные характеристики системы, а также перспективы ее развития и применения.

Состав системы 3D-зрения. Как указано выше, комплексная система 3D-зрения является составной частью подводного РТК. Разрабатываемая система 3D-зрения системы управления состоит из: модуля дальнего обзора, модуля ближнего обзора, модулей основного и дополнительного освещения; опорно-поворотного устройства; программного модуля обработки видеоинформации, установленного на управляющую ЭВМ.

Функциональная схема разрабатываемой системы зрения приведена на рисунке 2. Отметим, что, согласно схеме, модули ближнего обзора располагаются на манипуляторах РТК. Рабочая зона манипуляторов разрабатываемого подводного РТК составляет 1,2 м.

Разработанная комплексная система 3D-зрения подводного РТК позволяет в рабочем пространстве РТК получить оптическую информацию, 3D-изображения объектов и 3D-изображения самого рабочего пространства РТК. Кроме этого, система позволяет распознать выделенные объекты.

Каждый модуль основного освещения включает один светильник с постоянной яркостью свечения. Каждый модуль дополнительного освещения включает один светильник с постоянной яркостью свечения. Модули дополнительного освещения устанавливаются на модули ближнего обзора. Управление светильниками осуществляется оператором путем подачи напряжения питания с блока автоматики. Основные технические характеристики комплексной системы 3D-зрения приведены в таблице.

Комплексная система 3D-зрения идентифицирует объекты в секторе с радиусом до 5 м; определение их координат в пространстве относительно левой камеры модуля дальнего обзора; определение расстояний между точками интереса на изображении.

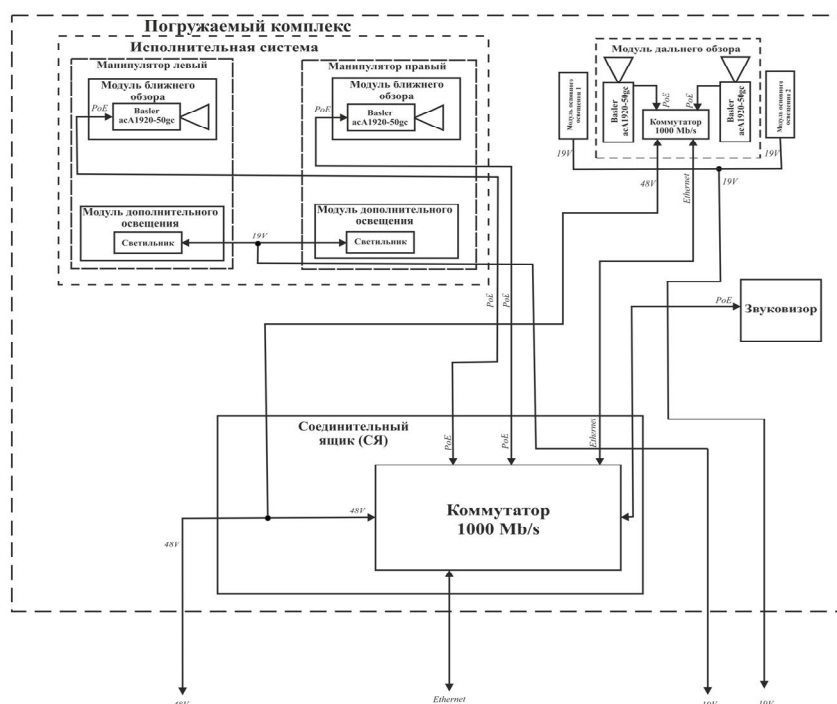


Рисунок 2 – Функциональная схема системы 3D-зрения подводного РТК

Таблица 1 – Основные технические характеристики комплексной системы 3D-зрения

№	Характеристики	Параметр
1	Зона работы комплексной системы 3D-зрения, не менее	Сектор с радиусом не более 5 м; телесным углом не более 2π ср;
2	Глубина погружения, м, не более	10
3	Напряжение электропитания, В	$+24 \pm 20$ %
4	Температура, °C	35
5	Степень защиты конструкции к воздействию воды по ГОСТ 14254-96	IP 68
6	Устойчивость к воздействию соляного (морского) тумана	
6.1	Дисперсность, мкм	1–10
6.2	Водность, г/м ³	2–3
6.3	Температура, °C	35
6	Показатели надежности	
6.1	Непрерывная работа, час., не менее	16
6.2	Вероятность безотказной работы в течение заданного периода непрерывной работы с коэффициентом доверия 70%, час., не менее	5000
6.3	Средняя наработка на отказ, час., не менее	1000
7	Время приведения комплексной системы 3D-зрения в готовность к применению из режима технического обслуживания, час., не более	1
8	Масса, кг, не более	30

Описание и обоснование выбранной конструкции комплексной системы 3D-зрения.

Рассмотрим конструкцию модулей системы зрения.

Модуль (подсистема) ближнего обзора. Модули ближнего обзора закреплены на манипуляторах и представляют из себя отдельные конструкции в герметичных корпусах с герметичными разъемами.

На каждом манипуляторе размещается по одному элементу модулю ближнего обзора (рис. 3). На каждый модуль ближнего обзора через соединительный интерфейс подается питание постоянного тока, напряжение 12В и канал управления EtherNet. Модуль ближнего обзора регистрирует цветное изображение на расстоянии до 1 м с разрешением не менее 800 ТВЛ. При этом угол обзора установлен равным $\pm 0,1\pi$ рад. Модули ближнего обзора оснащены модулем дополнительного освещения, который исполнен в герметичном корпусе и предназначен для дополнительной подсветки рабочей области.



Рисунок 3 – Модуль ближнего обзора

Модуль (подсистема) дальнего обзора. Модуль дальнего обзора регистрирует цветное изображение на глубину до 5 м с разрешением больше 500 ТВЛ, с частотой достаточной для построения траектории движения объекта со скоростью 0,05 м/с. При этом угол обзора устанавливается в диапазоне $\pm 0,2\pi$ рад (от продольной оси базового модуля).

В состав модуля дальнего обзора входят: жестко закрепленные относительно друг друга видеокамеры Basler acA1920-50gc, образующие стереопару; два элемента модуля основного освещения; коммутатор 1000 Мбит/с; преобразователи электропитания 24В–12В и 24В–9В. На рисунке 4 приведен вид модуля дальнего обзора.

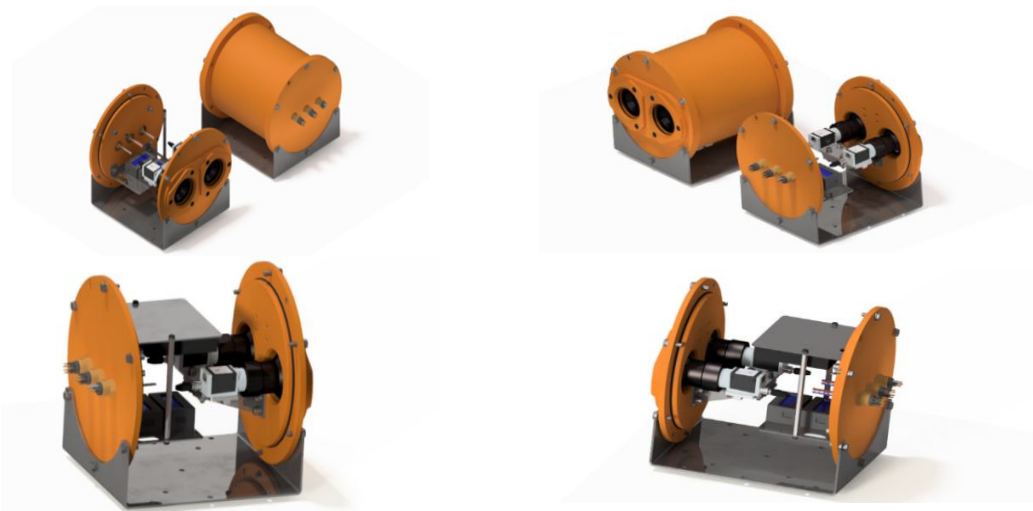


Рисунок 4 – Конструкция модуля дальнего обзора

По бокам модуля дальнего обзора размещаются модули основного освещения. Модуль основного освещения предназначен для подсветки рабочей зоны. Модуль основного освещения состоит из двух осветительных приборов, размещенных в герметичном корпусе.

Модуль дальнего обзора реализован в герметичном корпусе с герметичными разъемами. Модули основного освещения могут быть реализованы в отдельных герметичных корпусах, жестко фиксируемых к корпусу модуля дальнего обзора, или могут быть установлены в корпус

дальнего обзора с установкой теплоизолирующей перегородки внутри корпуса модуля дальнего обзора с целью недопущения перегрева видеокamer, коммутатора и периферии.

На рисунке 5 приведено изображение экспериментального образца модуля дальнего обзора, изготовленного для отработки технических вопросов конструкции модуля и разработки и отладки программно-математического обеспечения системы 3D-зрения.

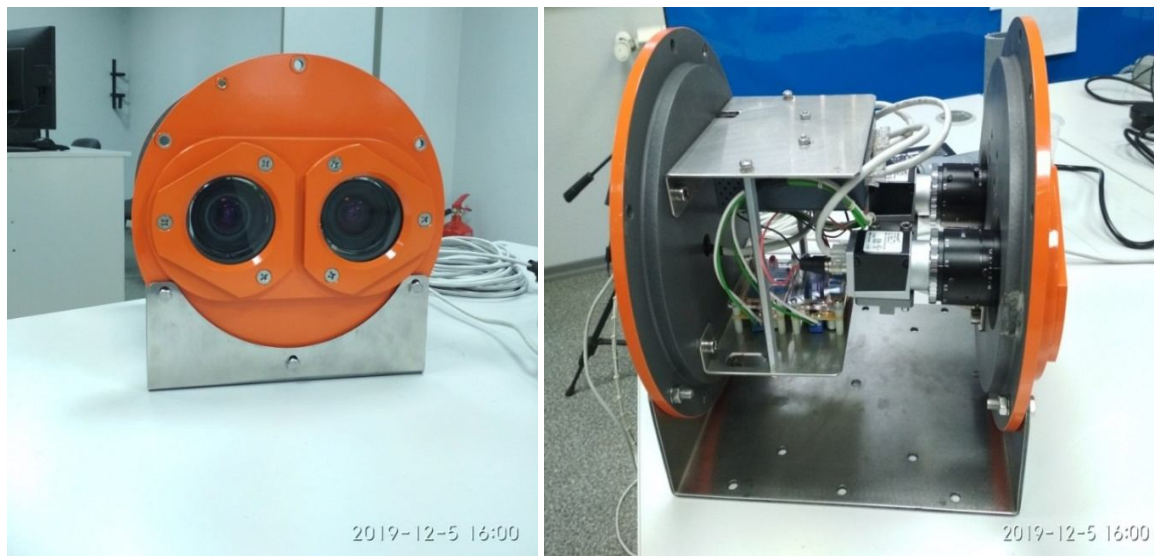


Рисунок 5 –Экспериментальный образец модуля дальнего обзора

Опорно-поворотное устройство. Модуль дальнего обзора устанавливается на опорно-поворотном устройстве (ОПУ). ОПУ обеспечивает вращение модуля дальнего обзора по углам азимута и места. ОПУ имеет два режима работы. Первый (основной) режим используется для выполнения операций в рабочем пространстве РТК и предполагает, что положение ОПУ зафиксировано относительно продольной оси модуля. Второй режим предназначен для построения панорамного изображения с помощью сканирования изображений в горизонтальной и вертикальной плоскостях. После окончания полного цикла обзора строится панорамное 3D-изображение, которое должно обеспечивать выполнение требований к геометрии оптики модуля обзора.

Углы обзора камеры в вертикальной и горизонтальной плоскостях в воздушной среде определяются выражением:

$$\alpha = 2 \arctg\left(\frac{l}{2f}\right),$$

где l – размер матрицы камеры ($11.3 \times 7,1$ мм), f – фокусное расстояние объектива (8 мм).

Для имеющихся камер и объективов, углы обзора по горизонтали и вертикали, рассчитанные по этой формуле, составляют 70.46 и 47.86 градусов, соответственно.

Углы обзора для подводной среды определяются по формуле:

$$\beta = 2 \arcsin\left(\frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{n}\right),$$

где $n = 1.33$ – коэффициент преломления, α – угол обзора в воздушной среде.

Угол обзора в водной среде по горизонтали составил 51.13 градусов, по вертикали – 35.14.

Рабочее пространство составляет ± 65 градусов в горизонтальной плоскости, и $-45^\circ \dots +75^\circ$ в вертикальной плоскости. Указанные углы представлены на рисунках 6 и 7.

Соединительный интерфейс. Соединительный интерфейс включает два преобразователя электропитания 24 В – 12 В и 24 В – 9 В и коммутатор EtherNet 1000 Мбит. К коммутатору EtherNet соединительного интерфейса подключены базовый модуль (два канала), модуль дальнего обзора, два модуля ближнего обзора, устройство копирующего типа и ЭВМ рабочего места оператора. Соединительный интерфейс реализован в герметичном корпусе с герметичными разъемами (рис. 7).

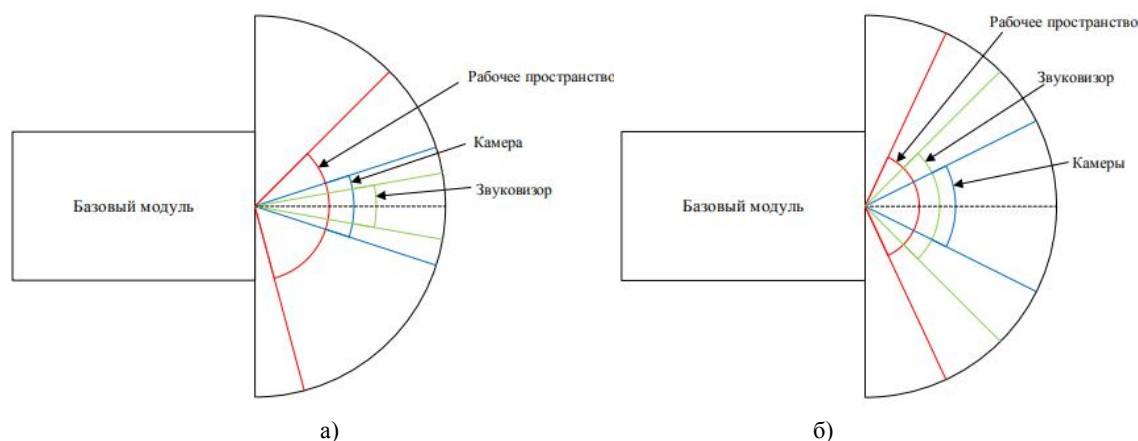


Рисунок 6 – Область наведения модуля обзора (а – вертикальная плоскость; б – горизонтальная плоскость)



Рисунок 7 – Соединительный интерфейс

Программное обеспечение обработки видеоданных стереокамеры (стереомодуля) в реальном времени. В ходе создания комплексной системы 3D-зрения для экспериментального образца подводного робототехнического комплекса была разработана программа, обрабатывающая данные, получаемые со стереокамеры в реальном масштабе времени. Разработанная программа определяет координаты обнаруженных в рабочей области подводного манипуляторного РТК объектов и определяет расстояния между точками интереса. С этой целью в программе осуществляется предобработка изображений; настройка параметров алгоритмов идентификации объектов.

Абсолютная система координат стереомодуля привязана к левой камере, т.е. начало системы координат располагается в точке полнуса камеры, которая удалена от диафрагмы объектива в отрицательном направлении на расстояние, которое равно фокусному расстоянию камеры.

Программа выполнена на языке C# и предназначена для работы под управлением платформы .NET Framework операционной системы Windows.

Программное обеспечение поддерживает пользовательский интерактивный интерфейс с возможностью обработки видеоизображений, полученных со стереомодуля в реальном времени.

Для получения видео потока программное обеспечение получает изображение с двух камер Basler acA1920-50gc, образующих стереопару и подключенных по интерфейсу GigE. Цифровой интерфейс GigE имеет большую скорость передачи данных, что позволяет передавать несжатые данные от видеокамер в реальном времени. Также благодаря использованию интерфейса GigE имеется возможность получать данные и управлять камерами на расстоянии до 100 метров. Изображение экрана графического интерфейса программы приведено на рисунке 8. Для подключения к камерам используется программный пакет ruloon API для языков .NET.

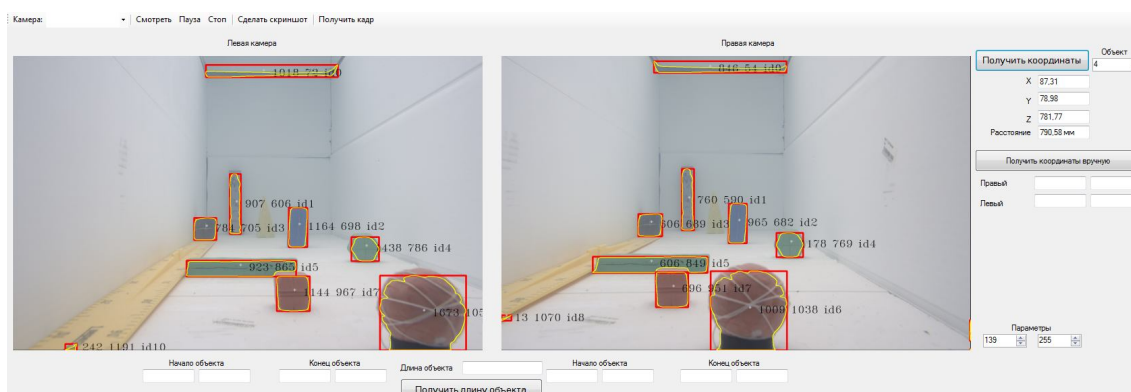


Рисунок 8 – Экран программы обработки данных от стереокамеры (стереомодуля) в реальном времени

Программа имеет возможность подключаться не только к камерам семейства Basler с интерфейсом GigE, но и к любым другим камерам по интерфейсам USB или TCP. В качестве примера приведен рисунок 9, на котором подключены IP камеры симулятора РТК передающие данные по протоколу TCP.

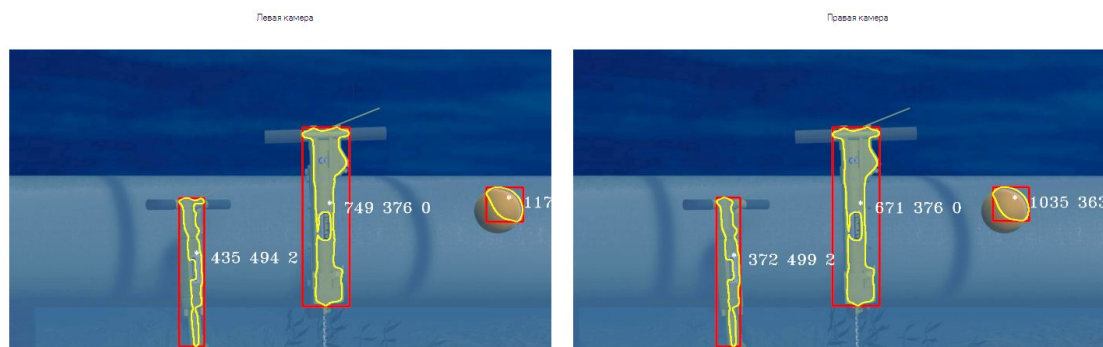


Рисунок 9 – Окно вывода графических данных полученных от IP камер симулятора РТК

Видеопоток выводится в два специальных графических окна (для левой и правой камер соответственно), на которых по результатам работы алгоритмов наносятся специальные графические метки (рис. 10). Графические метки выделяют границы объектов и выводят числовые данные координаты центра объекта на систему координат стереомодуля.

Для обработки кадров стереокамеры используется кроссплатформенная оболочка Emgu CV для библиотеки обработки изображений OpenCV. В этой библиотеке были использованы алгоритмы для калибровки оптической системы, нахождения оптического потока и триангуляции точек. В процессе триангуляции вычисляются координаты точки в трехмерном пространстве на основе координат ее проекций на стереокадре. В качестве базовой принимается модель стереокамеры, приведенная на рисунке 11.

Для определения контуров объектов в программе предусмотрен этап предварительной обработки изображений, в котором используется несколько алгоритмов: размытие, пороговое и морфологическое преобразование. На первом шаге осуществляется приведение изображения в оттенки серого. Это делается с целью максимально упростить изображение. Цвет увеличивает отношение сигнала к коэффициенту шума, поэтому сохранять цвета нет необходимости. Далее, для удаления шумов используется алгоритм размытия по Гауссу. Этот алгоритм удаляет из изображения высокочастотный контент (например, шум, края). На следующем шаге используется пороговая функция фиксированного уровня. Используется функция `threshold` для получения двоичного изображения из изображения в градациях серого. Фрагмент реализованного кода на C# приведен ниже. Как результат мы получаем изображение, в котором выделены отдельные объекты (рис. 12).

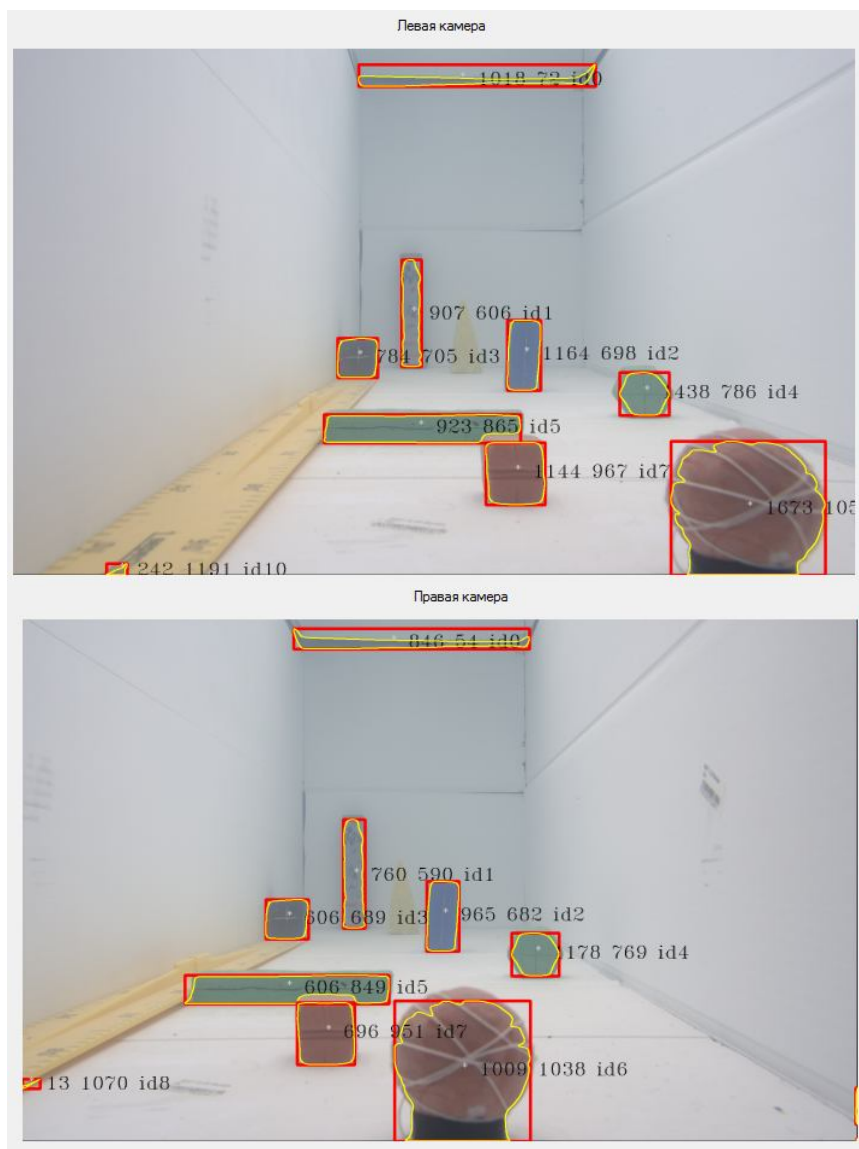


Рисунок 10 – Окно вывода графических данных

Фрагмент кода на C# реализации алгоритма для поиска объектов на изображении:

```
CvInvoke.CvtColor(inputImageL, bin1Mat, Emgu.CV.CvEnum.ColorConversion.Bgr2Gray);
CvInvoke.AdaptiveThreshold(bin1Mat, binNewMat, 249 + 0.0,
Emgu.CV.CvEnum.AdaptiveThresholdType.GaussianC, Emgu.CV.CvEnum.ThresholdType.BinaryInv,
15, 5 + 0.0);
CvInvoke.GaussianBlur(bin1Mat, bin2Mat, new Size(0, 0), 6);
CvInvoke.Threshold(bin2Mat, bin3Mat, gr1, gr2, Emgu.CV.CvEnum.ThresholdType.Binary);
CvInvoke.Threshold(bin3Mat, grayImage, gr1, gr2, Emgu.CV.CvEnum.ThresholdType.BinaryInv);
```

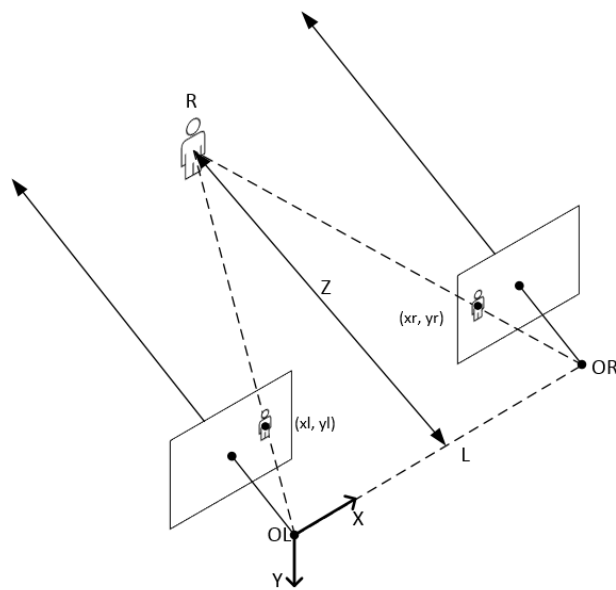


Рисунок 11 – Модель стереокамеры

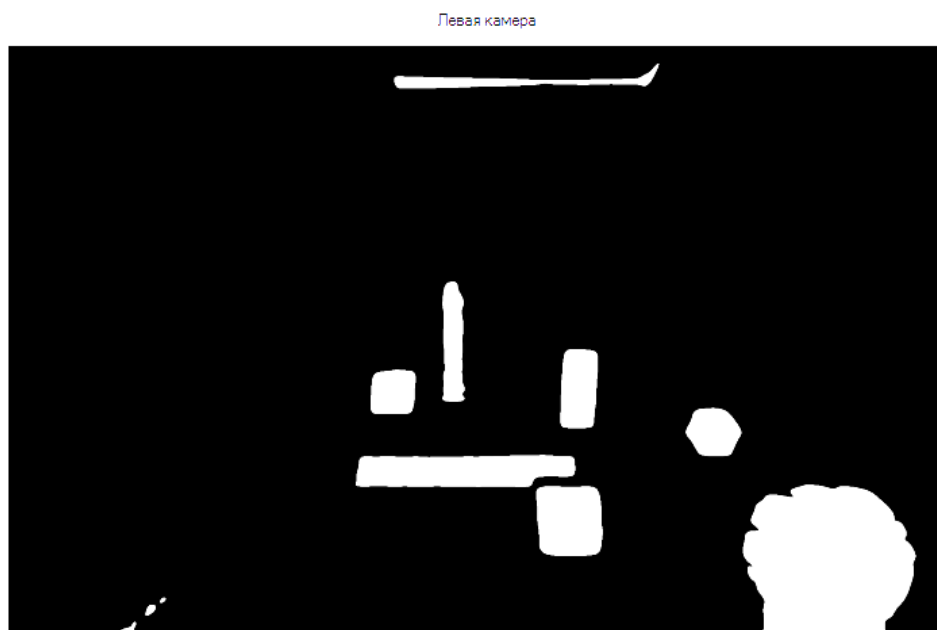


Рисунок 12 – Результат работы алгоритмов для поиска объектов на изображении

После проведенных преобразований изображения, с помощью функций `CvInvoke.FindContours` и `CvInvoke.Moments` из пакета `Emgu.CV` находим контуры объектов и их геометрические центры. Фрагмент кода на C# приведен далее:

```
CvInvoke.FindContours(bin3Mat, controls, hierarchy, Emgu.CV.CvEnum RetrType.Ccomp,
Emgu.CV.CvEnum.ChainApproxMethod.LinkRuns);
MCvMoments moments = CvInvoke.Moments(controls[i]); // координаты центра
var nm = moments.GravityCenter;
```

Реализованная программа обладает следующими функциональными возможностями:

1. Получение координат и расстояния до объекта для автоматически определенных предметов. В указанном режиме программа автоматически находит контуры объектов на изображениях и определяет геометрические центры плоской фигуры (центроид), по которым

с помощью триангуляции находят 3D-координаты объекта. Для определения расстояния необходимо выбрать интересующий объект и получить координаты. Соответствующий пункт меню приведен на рисунке 8.

2. Получение координат и расстояния по точкам на изображении установленным оператором вручную. При необходимости оператор может самостоятельно определить расстояние до любого интересующего его объекта. Для этого необходимо двойным нажатием мыши определить координаты на плоскости изображения отдельно для левой и правой камеры и получить координаты. Координаты отобразятся в соответствующих окнах (см. рис. 8).

3. Измерение длины объекта. Оператор имеет возможность определить длину интересующего его объекта. Для этого необходимо отметить координаты на изображении с обеих камер. Для этого, по событию MouseDown отмечается начало предмета, а по событию MouseUp – его конец. Результат будет отображен в соответствующем окне (см. рис. 8).

4. Получение расстояния между объектами. Оператор имеет возможность определить расстояние между объектами. Алгоритм аналогичен предыдущему. Оператор отмечает точки между интересующими объектами.

Заключение. В результате выполнения работ, разработана эскизная конструкторская документация на комплексную систему 3D-зрения, по которой с целью отработки технических решений изготовлен и отлажен экспериментальный образец системы. Были проведены испытания разработанной системы 3D-зрения в составе разработанного подводного робота (рис. 13) [18]. Исследование характеристик комплексной системы 3D-зрения, выполнялось в аквариуме и на симуляторе.

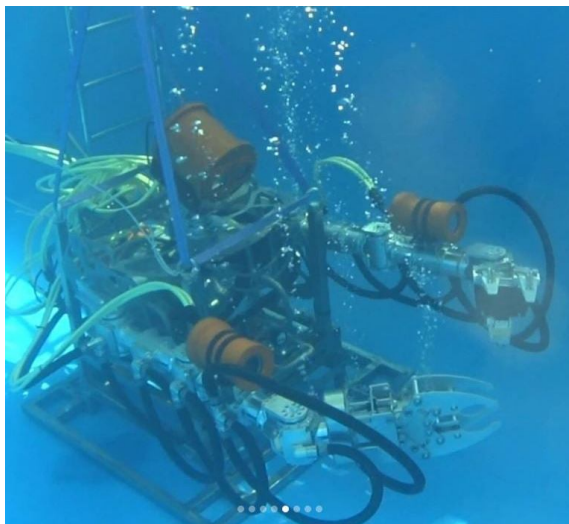


Рисунок 13 – Подводные испытания подводного робота с системой 3D-зрения

Проведенные испытания показали эффективность разработанных алгоритмов подводного стереозрения на дистанциях до 5 метров. Это позволит использовать разработанную аппаратно-программную систему стереозрения как в качестве элемента сенсорной системы робототехнического комплекса, так и в качестве системы целеуказания для подводных манипуляторов и автономных и телеуправляемых подводных аппаратов. Разработанная система может использоваться как составляющая интеллектуальной системы распознавания и идентификации объектов, в том числе и объектов, динамически изменяющих свое положение.

Библиографический список

1. Ястребова В. С. Подводные роботы / В. С. Ястребова. – Ленинград : Судостроение, 1977. – 368 с.
2. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. – Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
3. Casalino G. MARIS: A National Project on Marine Robotics for Interventions. 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) / G. Casalino, M. Caccia, A. Caiti, G. Antonelli, G. Indiveri, C. Melchiorri, S. Caselli // University of Palermo. June, 16–19, 2014, Palermo, Italy.
4. Lane D. M. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Replanning / D. M. Lane, F. Maurelli, T. Larkworthy, D. Caldwell, J. Salvi, M. Fox, K. Kyriakopoulos // IFACPaper-Online. – 2015. – Vol. 48, iss. 2. – P. 238–243.

5. Sanz P. J. TRIDENT: An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions / P. J. Sanz, P. Ridaó, G. Oliver, G. Casalino, Y. Petillot, C. Silvestre, C. Melchiorri, A. Turetta // *OCEANS*. – San Diego, September, 2013. – P. 23–27.
6. Кабанов А. А. Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D-зрения высокого разрешения / А. А. Кабанов, В. А. Крамарь, Б. А. Скороход и др. // Отчет о НИР (г/б №АААА-А18-11812259008). – Севастополь : СевГУ, 2018. – 403 с.
7. Kabanov A. A. The modeling of an anthropomorphic robot arm / A. A. Kabanov, A. N. Balabanov // *MATEC Web of Conferences 224 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018))*. Sevastopol, Russia, September, 2018. – Vol. 224. – P. 10–14. – DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822404024>.
8. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // Новый оборонный заказ. Стратегии. – Санкт-Петербург : ООО «Дифанс-Медиа», 2019. – № 5 (58).
9. Подводные манипуляторы. – Режим доступа: http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 03.07.2018 г.).
10. Автономный подводный робот-краб. – Режим доступа: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.07.2018).
11. Облегченный подводный пятистепенной электроманипулятор. – Режим доступа: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.07.2018).
12. Подводный робот политехников «Одиссей». – Режим доступа: https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 05.09.2018).
13. Crenganiu M. The Inverse Kinematics Solutions of a 7 DOF Robotic Arm Using Fuzzy Logic / M. Crenganiu, R. Breaz, G. Racz, O. Bologna // 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2012. – P. 518–523.
14. Shahinpoor M. A Robot Engineering : textbook / M. Shahinpoor. – New York : Harper & Row Publishers, Inc., 1987.
15. Fu K. S. ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence / K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee. – McGraw-Hill, 1987.
16. Kramar V. A. The method for predicting self-collisions of multi-link manipulators / V. A. Kramar // *Journal of Physics : Conference Series*. – 2020. – Vol. 1661, iss. 1. – 012052 p.
17. Skorohod B. A. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot / B. A. Skorohod, A. V. Statsenko, S. I. Fateev, P. V. Zhilyakov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1661, iss. 1. – 012124 p.
18. Kramar V. Modeling and testing of control system for an underwater dual-arm robot / V. Kramar, A. Kabanov, O. Kramar, A. Putin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 971, iss. 4. – 042076 p.

References

1. Yastrebova V. S. *Podvodnyye roboty* [Underwater robots]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 368 p.
2. *Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022. MarketsandMarkets*. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>.
3. Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C., Caselli S. MARIS: A National Project on Marine Robotics for Interventions. *2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, University of Palermo. June, 16–19, 2014, Palermo, Italy.
4. Lane D. M., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salvi J., Fox M., Kyriakopoulos K. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning. *IFAC PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 2, pp. 238–243.
5. Sanz P. J., Ridaó P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions. *OCEANS*. San Diego, September, 2013, pp. 23–27.
6. Kabanov A. A., Kramar V. A., Skorohod B. A. Razrabotka i issledovanie robototekhnicheskogo kompleksa dlya vipolneniya podvodno-tehnicheskikh rabot v usloviyakh ogranichennoi vidimosti s ispolsovaniem kompleksnoi systemi 3D zreniya visokogo raresheniya [Development and research of a robotic complex for performing underwater technical work in conditions of limited visibility using an integrated high-resolution 3D vision system]. *Otchet o NIR* [Report on NIR (g/b №АААА-А18-11812259008)]. Sevastopol, SevSU, 2018, 403 p.
7. Kabanov A. A., Balabanov A. N. The modeling of an anthropomorphic robot arm. *MATEC Web of Conferences 224, (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018))*. Sevastopol, Russia, September, 2018, vol. 224, pp. 10–14. DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822404024>.
8. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research. *Novyy oboronnyy zakaz. Strategies* [New defense order. Strategies], 2019, no. 5 (58).
9. *Podvodnyye manipulatory* [Underwater manipulators]. Available at: http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf.

10. *Avtonomnyy podvodnyy robot-krab* [Autonomous underwater robot-crab]. Available at: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html>.

11. *Oblegchennyy podvodnyy pyatistepennoy elektromanipulator* [Lightweight underwater five-degree electric manipulator]. Available at: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/>.

12. *Podvodnyy robot polyehnikov «Odyssey»* [Underwater robot polytechnic "Odyssey"]. Available at: https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1.

13. Crenganiu M., Breaz R., Racz G., Bologa O. The Inverse Kinematics Solutions of a 7 DOF Robotic Arm Using Fuzzy Logic. *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2012, pp. 518–523.

14. Shahinpoor M. *A Robot Engineering: textbook*. New York, Harper & Row Publishers, Inc., 1987.

15. Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G. *ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence*. McGraw-Hill, 1987.

16. Kramar V. A. The method for predicting self-collisions of multi-link manipulators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, iss. 1. 012052 p.

17. Skorohod B. A., Statsenko A. V., Fateev S. I., Zhilyakov P. V. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, iss. 1. 012124 p.

18. Kramar V., Kabanov A., Kramar O., Putin A. Modeling and testing of control system for an underwater dual-arm robot, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 971, iss. 4. 042076 p.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. **Содержание** каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В русскоязычном библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на странице сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т.п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте www.antiplagiat.ru) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте www.elibrary.ru. По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учетом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисовочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается **только в порядке исключения** для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не уместятся на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 1,25 см. Кавычки («»), скобки ([], ()), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

10.2. Все таблицы, рисунки, формулы должны иметь сквозную нумерацию в пределах текста статьи. Заголовки таблиц пишутся над ними и должны включать в себя номер таблицы и ее содержательное наименование.

10.3. Формулы должны иметь сквозную нумерацию в пределах текста статьи. Для формул желательно избегать «многоэтажных конструкций». Нумероваться могут только те формулы, на которые есть ссылки в статье. Размеры шрифтов для формул в MS Equation Editor: основные символы – 14 пт.; подстрочные и надстрочные индексы – 10 пт.; дополнительные индексы для подстрочных и надстрочных индексов – 8 пунктов. Константы в формулах записываются прямым шрифтом, переменные – курсивом (наклонным шрифтом); векторные и матричные величины – полужирным шрифтом. Матричные величины могут указываться в квадратных скобках, векторные величины (наборы скаляров) – в фигурных скобках.

Дополнительная информация для авторов статей

Рекомендации по оформлению графических аннотаций – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/graf_ann.pdf, дополнительных материалов к статьям – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/dop_mat.pdf.

Подробные правила оформления таблиц – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/tables.pdf>, оформления формул – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/formul.pdf>, оформления иллюстраций – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/ilustr.pdf>.

Пример оформления основного списка литературы к статье – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/spisok_liter.pdf, транслитерированного списка – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/trans_spisok_liter.pdf.

**Подписка на наши издания осуществляется
по Объединённому каталогу «Пресса России»**

Журнал фундаментальных и прикладных исследований «Гуманитарные исследования»

Подписной индекс – 11109

В журнале публикуются статьи по широкому спектру проблем гуманитарного знания. Ведущие направления публикаций отражены в следующих рубриках: «Языкознание», «Литературоведение».

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 3762 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научно-технический журнал «Геология, география и глобальная энергия»

Подписной индекс – 11173

Редколлегия журнала принимает к рассмотрению статьи по проблемам геологии, нефтегазоносности различных регионов, охватывающие важнейшие и крайне полезные для науки и производства, а также для обучения студентов естественного направления.

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 4500 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научный журнал «Каспийский регион: политика, экономика, культура»

Подписной индекс – 11170

Профиль журнала – анализ проблем настоящего, прошлого и будущего Каспийского региона в их взаимосвязи с современным развитием мира.

Издание имеет многоплановый, междисциплинарный характер, знакомит читателя с исследованиями и дискуссиями во всех областях социальных и гуманитарных знаний по проблемам Каспийского региона.

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 3500 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научно-технический журнал «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии»

Подписной индекс – 73313

На страницах журнала представлены результаты исследований и новейшие разработки в области технических наук.

Ведущие направления публикаций отражены в следующих рубриках: «Управление в социальных и экономических системах», «Системный анализ, управление и обработка информации», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», «Информационная безопасность и защита информации», «Информационно-измерительные и управляющие системы».

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 9000 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Предлагаем всем желающим разместить в наших изданиях рекламу.
Адрес Издательского дома «Астраханский университет»:
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а; тел. (8512) 24-64-95, 24-68-37
e-mail: asupress@yandex.ru

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2021
№ 2 (54)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель
Астраханский государственный университет
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Подписной индекс – 73313
По Объединенному каталогу «Пресса России»

Главный редактор И.М. Ажмухамедов

Редактирование,
компьютерная правка, верстка *А.М. Докукиной*

Дата выхода в свет 13.08.2021 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 10,4. Усл. печ. л. 14,56.
Заказ № 4345. Тираж 500 экз. (первый завод – 22 экз.)

Оттиражировано на базе Издательского дома «Астраханский университет»
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
Тел. (8512) 24-64-95, тел./факс (8512) 24-68-37
E-mail: asupress@yandex.ru