

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2019

№ 4 (48)

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»

2019

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Астраханского государственного университета

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2019
№ 4 (48)

Редакционная коллегия

И.М. Ажмухамедов, доктор технических наук, профессор, зав. 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)

Ю.М. Брумитейн, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии» Астраханского государственного университета (ответственный секретарь)

Ж.И. Батырканов, доктор технических наук, профессор, профессор Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (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

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

Д.А. Усанов, заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика твердого тела» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

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», 2019
© Свиридов В. Б., дизайн обложки, 2019

ASTRAKHAN STATE UNIVERSITY

PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii

CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2019
No. 4 (48)

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”
2019

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan State University

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2019
No. 4 (48)**

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 – KAI»

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

Yu.M. Brumshteyn, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Astrakhan State University (Executive Editor)

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

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

D.A. Usanov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), head of the department «Solid State Physics», Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky

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-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», 2019
© V. B. Sviridov, cover design, 2019

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

<i>Ажмухамедов И.М.</i>	35–42	<i>Мельников Е.В.</i>	35–42
<i>Брумитейн Ю.М.</i>	81–98	<i>Митягин С.А.</i>	60–70
<i>Власенко А.В.</i>	121–127	<i>Митюгов А.И.</i>	42–51
<i>Воронин Д.Ю.</i>	60–70	<i>Михеев А.В.</i>	110–120
<i>Врублевская К.А.</i>	81–98	<i>Николаенко А.Ю.</i>	164–175
<i>Дабагов А.Р.</i>	10–24	<i>Новикова Е.Ф.</i>	127–135
<i>Евсюков М.В.</i>	121–127	<i>Парыгин Д.С.</i>	60–70
<i>Ермаков Р.В.</i>	144–164	<i>Подольцев В.В.</i>	24–34
<i>Калихман Д.М.</i>	144–164		35–42
<i>Кондрашов Д.С.</i>	10–24	<i>Пулято М.М.</i>	121–127
			135–143
<i>Кравец А.Г.</i>	51–59	<i>Савина О.В.</i>	60–70
<i>Курочкин Л.М.</i>	99–109	<i>Садовникова Н.П.</i>	60–70
<i>Курочкин М.А.</i>	99–109	<i>Серанова А.А.</i>	144–164
<i>Лошманов В.И.</i>	51–59	<i>Серебровский В.В.</i>	10–24
<i>Львов А.А.</i>	144–164	<i>Хализев В.Н.</i>	127–135
	164–175	<i>Частикова В.А.</i>	42–51
<i>Мавлюдова Н.И.</i>	81–98	<i>Чернышев А.С.</i>	99–109
<i>Макарян А.С.</i>	121–127	<i>Чуватов М.В.</i>	99–109
	135–143	<i>Шехине М.Т.</i>	10–24
<i>Маликов В.П.</i>	60–70	<i>Юрков Н.К.</i>	164–175
<i>Малютина И.А.</i>	10–24		
<i>Масаев С.Н.</i>	71–80		

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

А.Р. Дабагов, И.А. Малютина,

Д.С. Кондрашов, В.В. Серебровский, М.Т. Шехине

Автоматизированная система для классификации заболеваний молочной железы по рентгеновским маммографическим снимкам 10–24

В.В. Подольцев

Системный анализ методов синхронной обработки информации в МАС-протоколах множественного доступа с использованием псевдослучайных последовательностей 24–34

И.М. Ажмухамедов, Е.В. Мельников, В.В. Подольцев

Особенности синхронизации генераторов апериодических псевдослучайных последовательностей в широкополосных и CDMA-системах связи 35–42

В.А. Частикова, А.И. Митюгов

Разработка эффективной архитектуры искусственной иммунной системы на основе её гибридизации с модифицированным генетическим алгоритмом дуэлей 42–51

В.И. Лошманов, А.Г. Кравец

Прогнозирование сроков применения лекарственных препаратов для достижения пациентом стабильного состояния 51–59

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О.В. Савина, В.П. Маликов, Н.П. Садовникова,

Д.С. Парыгин, Митягин С. А., Воронин Д. Ю.

Прогнозирование стоимости объектов недвижимости на основе комплексного анализа их свойств 60–70

С.Н. Масаев

Оценка стратегии управления персоналом резидента особой экономической зоны как задача моделирования состояний многомерной динамической системы 71–80

К.А. Врублевская, Ю.М. Бруштейн, Н.И. Мавлюдова

Методы и модели управления рисками деятельности коллекторских агентств в условиях развития информационно-телекоммуникационных технологий 81–98

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

А.М. Курочкин, А.С. Чернышев,

М.А. Курочкин, М.В. Чуватов

Анализ целесообразности разработки гибридных моделей транспортных систем 99–109

А.В. Михеев

Вероятностная модель динамики спроса при ограниченном предложении товара на рынке 110–120

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

**А.В. Власенко, М.В. Евсюков,
М.М. Путьто, А.С. Макарян**

Исследование реализации механизмов инкапсуляции ключей
постквантовых криптографических методов 121–127

Е.Ф. Новикова, В.Н. Хализев

Разработка модели угроз для объектов
критической информационной инфраструктуры
с учетом методов социальной инженерии 127–135

М.М. Путьто, А.С. Макарян

Классификация мессенджеров
на основе анализа уровня безопасности хранимых данных 135–143

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Р.В. Ермаков, А.А. Серанова, А.А. Львов, Д.М. Калихман

Метод оценивания угловой скорости прецизионного поворотного стенда 144–164

А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, Н.К. Юрков

СВЧ измеритель на основе многоканального векторного вольтметра
в системах радиочастотной идентификации 164–175

**Перспективные проекты и технологии, продвижением которых
занимается «Центр трансфера технологий»**

Астраханского государственного университета 176

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 177

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

A.R. Dabagov, I.A. Malyutina,

D.S. Kondrashov, V.V. Serebrowsky, M.T. Chahine

Automated system for classifying breast diseases by X-RAY mammography 10–24

V.V. Podoltsev

System analysis of methods of synchronous processing
of information in MAC protocols of multiple access

using pseudorandom sequences 24–34

I.M. Azhmuamedov, E.V. Melnikov, V.V. Podoltsev

Features of synchronization of generators
of aperiodic pseudorandom sequences in wideband
and CDMA communication systems.....

35–42

V.A. Chastikova, A.I. Mityugov

Development of an effective architecture
of an artificial immune system based on its hybridization
with the modified genetic algorithm of duels

42–51

V.I. Loshmanov, A.G. Kravets

Forecasting the timing of drug use
to achieve a stable patient's condition

51–59

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

O.V. Savina, V.P. Malikov, N.P. Sadovnikova,

D.S. Parygin, S.A. Mityagin, D.Yu. Voronin

Forecasting the value of real estate on the basis
of a comprehensive analysis of its properties

60–70

S.N. Masaev

Assessment of human resource management strategy
of the resident a special economic zone as the task modeling
the states of multidimensional dynamic system.....

71–80

K.A. Vrublevskaya, Yu.M. Brumshteyn, N.I. Mavlyudova

Methods and models of collection agency risk management

in conditions of information and telecommunication technologies development 81–98

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

L.M. Kurochkin, A.S. Chernyshev, M.A. Kurochkin, M.V. Chuvatov

Analysis of the development of hybrid models of transport systems 99–109

A.V. Mikheev

Probabilistic model of the demand dynamics
with fixed supply of goods on the market.....

110–120

INFORMATION SAFETY AND INFORMATION PROTECTION

A.V. Vlasenko, M.V. Evsyukov, M.M. Putyato, A.S. Makaryan

Research of key encapsulation mechanisms
based on postquantum cryptographic algorithms..... 121–127

E.F. Nokikova, V.N. Khalizev

The development of a threat model for critical information
infrastructure facilities considering social engineering methods 127–135

M.M. Putyato, A.S. Makaryan

Classification of messengers
based on analysis of the security level of stored data..... 135–143

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

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

R.V. Ermakov, A.A. Seranova, A.A. Lvov, D.M. Kalikhman

Method for evaluating angular velocity of a precision rotary table..... 144–164

A.Yu. Nikolaenko, A.A. Lvov, N.K. Yurkov

A microwave analyzer based on the multi-channel vector voltmeter
for radio frequency identification systems 164–175

Perspective projects and technologies promoted

by the Technology Transfer Center of Astrakhan State University..... 176

RULES FOR THE AUTHORS..... 177

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.010-024

УДК 004.032.26; 615.4

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ МАММОГРАФИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Статья поступила в редакцию 19.10.2019, в окончательном варианте – 29.10.2019.

Дабатов Анатолий Рудольфович, АО «Медицинские технологии Лтд», 105318, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ибрагимова, 31,

кандидат технических наук, президент АО «Медицинские технологии Лтд», e-mail: dar@mti.ru

Малюткина Ирина Алексеевна, Юго-Западный государственный университет, 305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, аспирант, e-mail: Irina92_2010@mail.ru

Кондрашов Дмитрий Сергеевич, Юго-Западный государственный университет, 305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, аспирант, e-mail: kondrashov012@mail.ru

Серебровский Вадим Владимирович, Юго-Западный государственный университет, 305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, доктор технических наук, профессор, e-mail: SFilist@mail.ru

Шехине Мохамед Туфик, Курский государственный медицинский университет, 305041, Российская Федерация, г. Курск, ул. К. Маркса, 3, кандидат технических наук, доцент, e-mail: chahine@KgmU.com

Цель исследования заключается в разработке классификаторов для автоматизированной системы скрининговой классификации маммограмм молочной железы. Исследована трехэтапная классификация рентгеновских снимков молочной железы. На первом этапе осуществляется семантическая сегментация изображения. На втором этапе из выделенных сегментов формируется область интереса, а на третьем этапе принимается решение о принадлежности области интереса к известному морфологическому образованию. ЛПР может вмешаться в процесс классификации как на втором, так и на третьем этапах. В автоматизированной системе применяется двухальтернативный классификатор, основанный на методе максимального правдоподобия. Классификатор включает алфавит из двух классов C1 и C2. Класс C1 соответствует блокам в состоянии нормы, а класс C2 – это блоки, у которых имеются морфологические образования, вызванные патологическими процессами. В качестве входных данных для расчета информативных показателей использовались тестовые маммографические изображения молочной железы из базы данных MIAS с подтвержденными диагнозами. Проведена экспериментальная апробация программного обеспечения автоматизированной системы по классификации рентгенограмм молочной железы по классам «нет области интереса» или «есть область интереса». В качестве текстурных характеристик классифицируемых сегментов предложено использовать статистические характеристики яркости пикселей сегмента: моду, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение. Проведен разведочный анализ текстурных характеристик выборок двух классов: C1 – норма и C2 – новообразование. Получен критерий оценки результатов классификации маммографических изображений. Эксперименты на контрольных выборках показали диагностическую эффективность по классам рентгенограмм «нет области интереса» – «есть область интереса» не ниже 90 %, а по классам сегментов «норма» – «патология» не ниже 91 %.

Ключевые слова: онкологические заболевания, рентгенограммы молочной железы, сегментация, морфологические образования, область интереса, классификатор, метод максимального правдоподобия, показатели качества классификации

AUTOMATED SYSTEM FOR CLASSIFYING BREAST DISEASES BY X-RAY MAMMOGRAPHY

The article was received by the editorial board on 19.10.2019, in the final version – 29.10.2019.

Dabagov Anatoly R., JSC “Medical Technologies Ltd”, 31 Ibragimov St., Moscow, 105318, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), President of JSC “Medical Technologies Ltd”, e-mail: dar@mti.ru

Malyutina Irina A., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305040, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: Irina92_2010@mail.ru

Kondrashov Dmitry S., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305040, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: kondrashov012@mail.ru

Serebrovsky Vadim V., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305040, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: SFilist@mail.ru

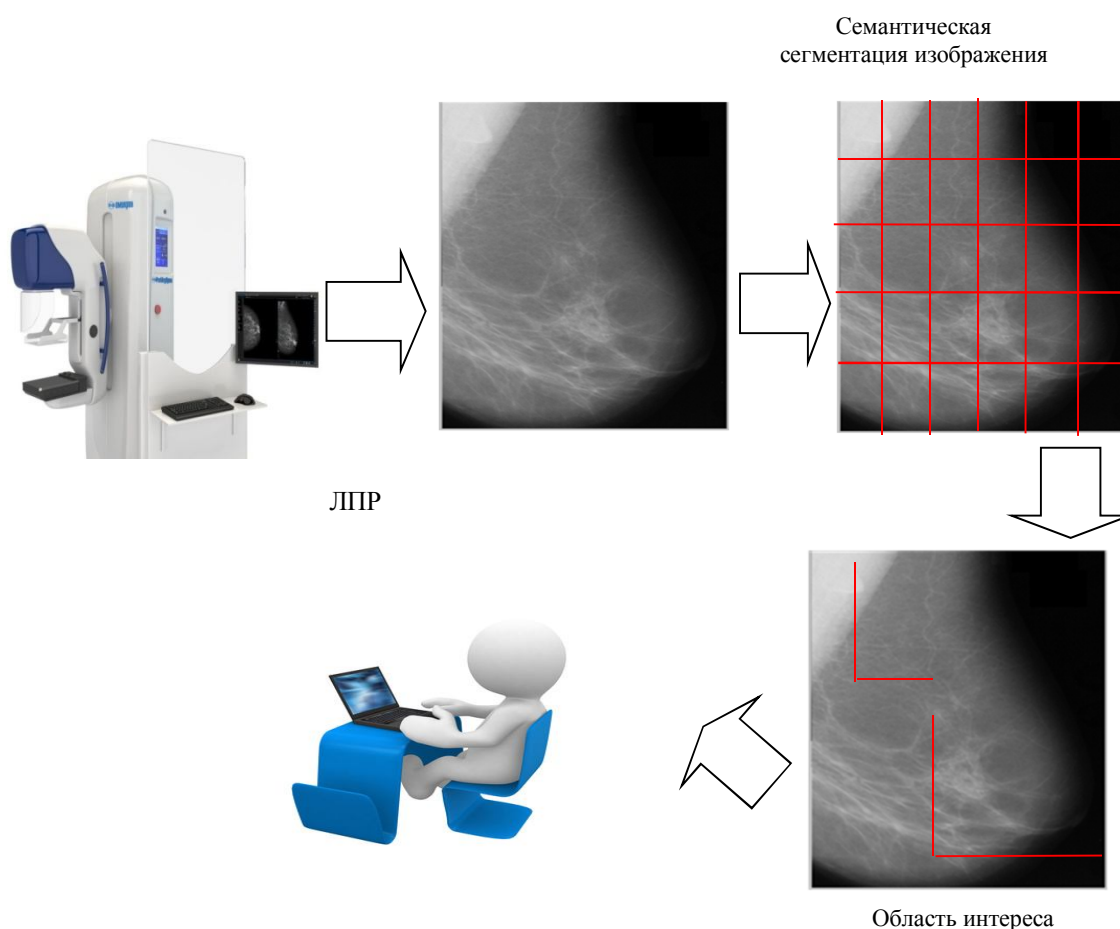
Chahine Mohamad T., Kursk State Medical University, 3 Karl Marks St., Kursk, 305041, Russian Federation

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chahine@Kgmu.com

The aim of the study is to develop classifiers for an automated system of screening classification of mammograms of the breast. A three-stage classification of breast x-rays was investigated. At the first stage, semantic segmentation of the image is carried out. At the second stage, an area of interest is formed from the selected segments, and at the third stage, a decision is made on whether the area of interest belongs to a known morphological formation. The LPR can intervene in the classification process, both in the second and third stages. The automated system uses a two-alternative classifier based on the maximum likelihood method. The classifier includes an alphabet of two classes C1 and C2. Class C1 corresponds to blocks in the normal state, and class C2-these are blocks that have morphological formations caused by pathological processes. Test mammographic images of the breast from the MIAS database with confirmed diagnoses were used as input data for the calculation of informative indicators. Experimental approbation of the software of the automated system on classification of radiographs of a mammary gland on classes "there is no area of interest" or "there is an area of interest" is carried out. As textural characteristics of the classified segments, it is proposed to use statistical characteristics of the brightness of the pixels of the segment: mode, expectation, standard deviation. The exploratory analysis of textural characteristics of samples of two classes: C1 – norm, and C2 – neoplasm is carried out. A criterion for evaluating the results of classification of mammographic images was obtained. Experiments on control samples showed diagnostic efficiency for classes of radiographs "there is no area of interest" – "there is an area of interest" not lower than 90 %, and for classes of segments "norm" – "pathology" not lower than 91 %.

Key words: cancers, breast X-rays, segmentation, morphological formations, area of interest, classifier, method of maximum plausibility, classification quality indicators

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Рак молочной железы (МЖ) является самым распространенным онкологическим заболеванием среди женщин [2, 5]. Основным методом диагностики данного заболевания, имеющим высокую точность и позволяющим выявить его на ранних стадиях развития, когда его невозможно детектировать тактильно и он не вызывает дискомфорта у пациента, является маммография – процедура рентгенографии МЖ. Именно использование снимков маммографии в большинстве случаев является основным для разработки компьютерных систем медицинской диагностики этого вида заболеваний.

Компьютерная скрининговая диагностика патологий по маммографическим снимкам позволяет обнаружить области интереса с помощью методов пороговой фильтрации, дискретного вейвлет-преобразования, морфологических операторов [1, 10, 11]. Области интереса, которые могут принадлежать патологиям, выделяются с помощью методов разрастания областей, выделения контуров областей патологии, выделения и анализа текстурных признаков [4, 6, 12]. Для классификации патологий в последних исследованиях используют искусственные нейронные сети, имеющие либо классическую архитектуру, описанную в [13, 14, 15], либо архитектуру, подобранную для конкретной задачи. Последнее позволило получить значение истинно положительных результатов (*TPR*) классификации патологий рака МЖ 92 % при ложно положительных решениях (*FPR*) 0,2 на одном снимке маммографии. Такие результаты являются одними из самых лучших среди существующих на сегодняшний день систем медицинской диагностики рака МЖ.

Однако маммограммы относятся к сложноструктурируемым изображениям, что вызывает ряд трудностей при их классификации известными методами, в том числе и с использованием нейронных сетей [8, 16, 17]. С целью преодоления этих трудностей используют интерактивный режим классификации, который включает три этапа. На первом этапе выполняется сегментация маммограммы, на втором этапе из выделенных сегментов формируется область интереса, а на третьем этапе принимается решение о принадлежности области интереса к известному морфологическому образованию. Лицо, принимающее решение (ЛПР), может вмешаться в процесс классификации, как на втором, так и на третьем этапах.

Первый этап классификации был подробно рассмотрен в [3]. Для реализации второго и/или третьего этапов необходимо формирование дескрипторов, которые адекватно бы описывали выделенные сегменты. Такие дескрипторы очень часто формируют на основе статистических характеристик пикселей в сегментах.

Статистические характеристики могут быть сформированы посредством двух подходов. Первый подход основан на глобальном анализе маммограмм, который не учитывает дислокацию морфологического образования на маммографическом снимке. Второй подход основан на локальном анализе, который учитывает координаты выделяемого морфологического образования на рентгеновском снимке. Последний вариант анализа требует разметки маммограммы и привязки морфологического образования к разметочной сетке. Учитывая, что сам процесс автоматической обработки рентгенограммы МЖ требует больших вычислительных ресурсов, а использование второго подхода к получению дескрипторов увеличивает на порядок необходимые вычислительные ресурсы, в данной работе будем рассматривать первый подход.

Материалы и методы. В автоматизированной системе применяется двухальтернативный классификатор, основанный на методе максимального правдоподобия. Классификатор включает алфавит из двух классов C_1 и C_2 . Класс C_1 соответствует блокам в состоянии нормы, а класс C_2 – это блоки, у которых имеются морфологические образования, вызванные патологическими процессами.

В качестве входных данных для расчета информативных показателей использовались тестовые маммографические изображения молочной железы из базы данных MIAS с подтвержденными диагнозами [19, 20]. Для обучения классификатора были отобраны 120 изображений из базы данных MIAS с выявленными морфологическими новообразованиями, по которым была сформирована обучающая выборка, обеспечивающая выявление показателей, характеризующих состояние обследуемого. Она представляет собой 250 сегментов, находящихся в состоянии нормы, и 120 сегментов, у которых имеются морфологические новообразования, вызванные патологическими процессами. Вследствие этого вводятся два критерия: «нет области интереса», «есть область интереса». Фрагменты тестовых снимков эталонных образцов для класса C_1 и C_2 представлены на рисунке 1.

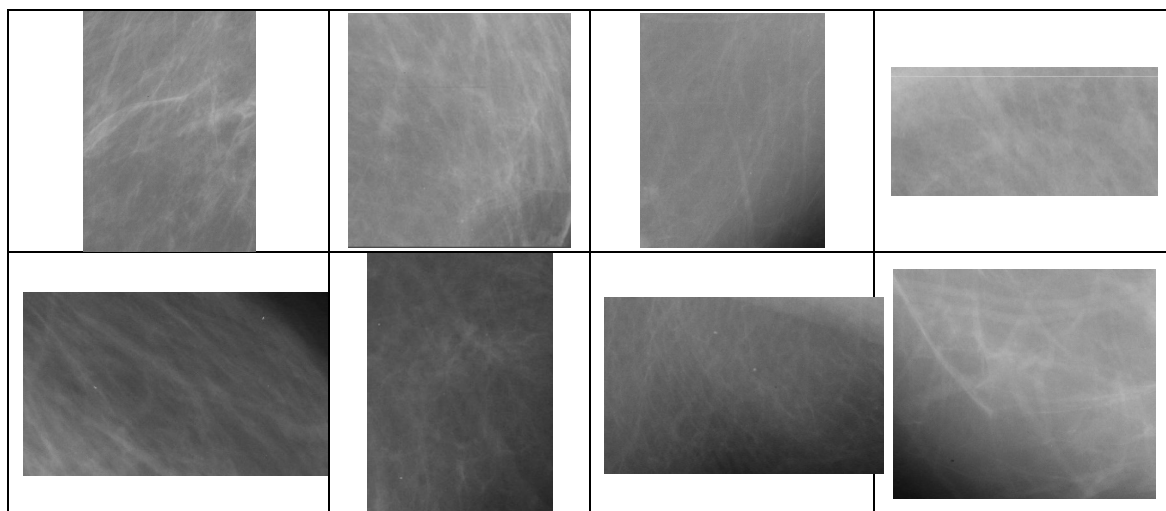


Рисунок 1 – Фрагменты тестовых снимков эталонных образцов в состоянии нормы

Каждому блоку соответствует предиктор P2, описываемый вектором в трехмерном пространстве. В качестве первого показателя, оценивающего сегмент на предмет морфологического образования, была выбрана статистическая характеристика – мода ($X1$), представляющая из себя значение яркости пикселя, которое встречается наиболее часто в выбранном сегменте. В качестве второго показателя используется математическое ожидание ($X2$). В качестве третьего показателя выступает среднеквадратическое отклонение ($X3$).

Значения математических ожиданий рассчитываются по формуле [18]:

$$\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i, \quad (1)$$

где X_i – значения яркостей пикселей в выборке.

Расчет среднеквадратического отклонения осуществляется, согласно [18], по формуле:

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (2)$$

В таблице 1 представлен фрагмент рассчитанных значений моды, математического ожидания и среднеквадратического отклонения для блоков, в которые не попали морфологические образования.

Таблица 1 – Фрагмент рассчитанных характеристик для сегментов класса C_1

№	$X1$	$X2$	$X3$
1	107	106	16,67
2	99	88	29,35
3	107	99	19,75
4	117	93	25,69
5	60	52	25,87
6	99	93	22,02
7	94	96	20,06
8	89	96	17,01
9	89	95	19,23
10	94	100	19,53
11	40	46	31,73
12	54	45	29,27
13	77	79	16,37
14	89	79	29,22
15	99	77	30,58

Из обучающей выборки следует вывод о том, что для блоков в состоянии нормы значения моды не превышают показатель 143, для математического ожидания – 153, а для среднеквадратического отклонения – 36,71. Усредненные значения моды, математического ожидания и среднеквадратического отклонения равны, соответственно, 93,50; 88,47; 25,12.

В таблице 2 представлен фрагмент рассчитанных значений моды, математического ожидания и среднеквадратического отклонения для блоков, у которых имеются морфологические новообразования, вызванные патологическими процессами.

Из обучающей выборки следует вывод о том, что для блоков, в которых имеются морфологические новообразования, вызванные патологическими процессами значения моды, не превышают показатель 250, математического ожидания – 227, а для среднеквадратического отклонения – 67,11. Усредненные значения моды, математического ожидания и среднеквадратического отклонения равны, соответственно, 176,40; 183,10; 32,15.

Таблица 2 – Фрагмент рассчитанных характеристик для сегментов класса C_2

№	X1	X2	X3
1	174	186	39,9
2	170	184	67,11
3	177	208	64,01
4	198	168	43,01
5	188	201	53,73
6	170	156	43,83
7	146	160	40,94
8	170	205	44,33
9	185	182	48,16
10	158	150	40,03
11	153	173	42,74
12	151	145	41,41
13	159	187	42,81
14	174	212	31,83
15	169	182	37,49

На рисунке 2 представлен фрагмент блока в состоянии нормы, а также его гистограмма, а на рисунке 3 – фрагмент блока, в который попали морфологические новообразования и его гистограмма

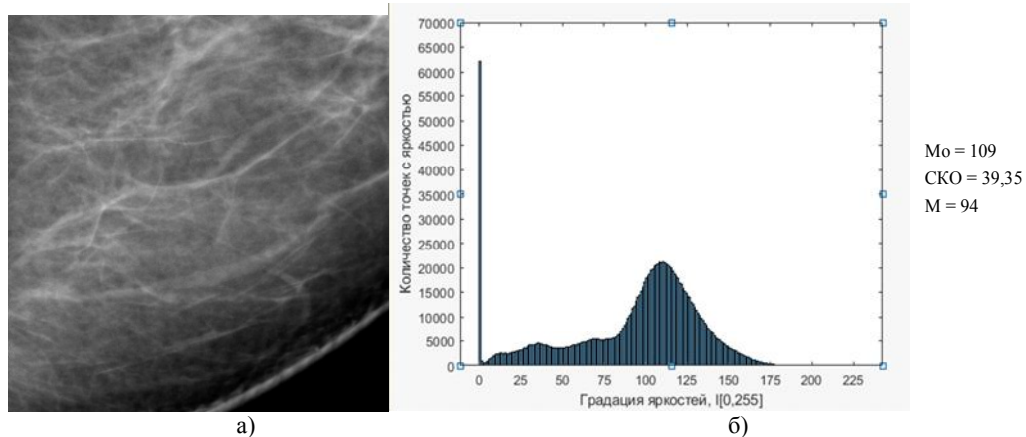


Рисунок 2 – Фрагмент блока в состоянии нормы и его гистограмма

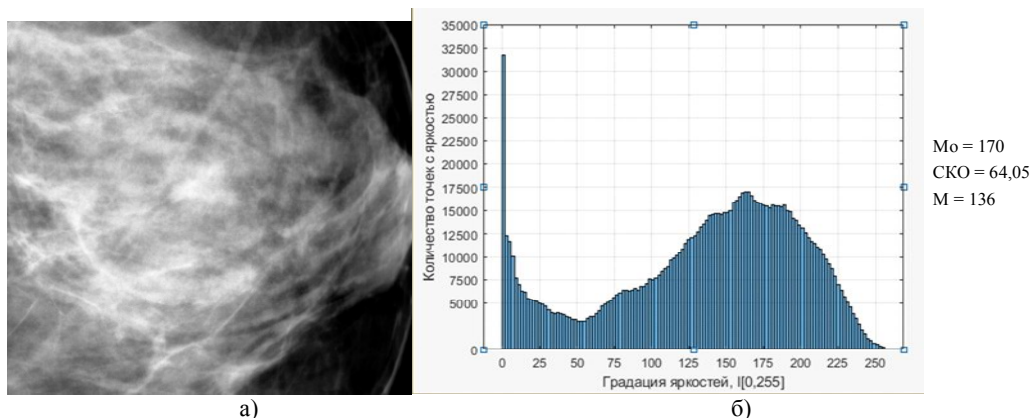


Рисунок 3 – Фрагмент блока, в который попали морфологические новообразования и его гистограмма

Полагаем, что каждый класс задается трехмерным нормальным распределением совместной плотности вероятностей компонентов вектора P_2 . Нормальный характер такого распределения подтверждается проверкой отдельных его компонент и следствием центральной предельной теоремы.

Для проверки выборки на соответствие нормальному закону распределения была использована программа STATISTICA. Для предварительного анализа были построены гистограммы и квантиль-квантиль графики.

На рисунках 4а, 5а, 6а представлены графики гистограмм для трех показателей класса C_1 : мода, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, а для класса C_2 – на рисунках 4б, 5б, 6б.

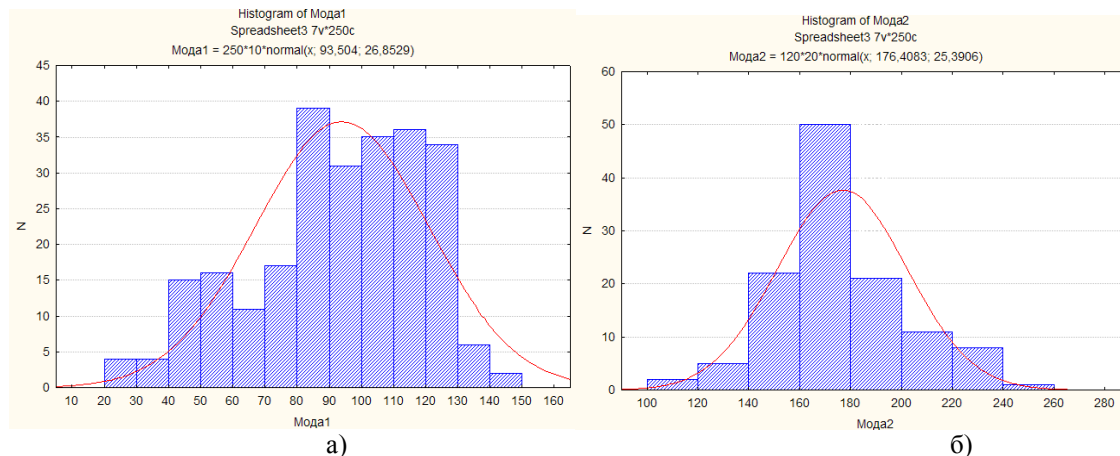


Рисунок 4 – Гистограмма нормального распределения для моды: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

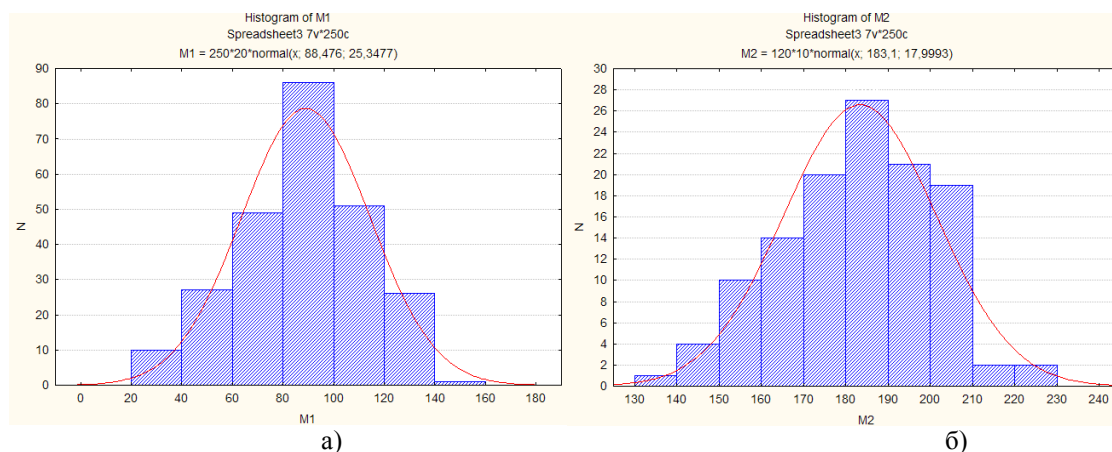


Рисунок 5 – Гистограмма нормального распределения для математического ожидания: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

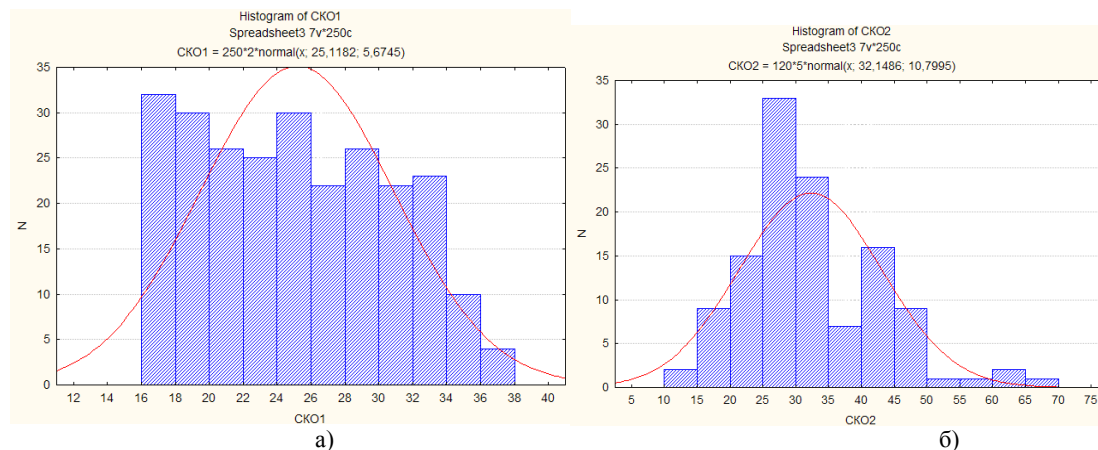


Рисунок 6 – Гистограмма нормального распределения для среднее квадратического отклонения: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

В целом распределение значений анализируемых признаков на рисунках 4, 5 и 6 совпадает с нормальным (столбики гистограмм примерно выстраиваются в колоколообразную фигуру). Однако это заключение основано только на визуальном анализе распределения, потому ему необходимо более строгое подтверждение. Так, на рисунке 4а и 6а на гистограммах имеются ярко выраженные «выбросы», а на гистограммах рисунков 4б и 6б присутствуют аномальные значения по краям распределения, поэтому воспользуемся еще одним методом визуального анализа – диаграммой рассеяния (квантиль-квантиль графиками) наблюдаемых значений относительно (нормированных) ожидаемых значений при заданном распределении.

На рисунках 7а, 8а, 9а изображены квантиль-квантиль графики для трех показателей класса C_1 , а для класса C_2 – на рисунках 7б, 8б, 9б. Из графиков квантиль-квантиль следует вывод о том, что все точки лежат вдоль линии, что не противоречит нормальному закону распределения. Однако проведенная проверка, результаты которой показаны выше, является недостаточно строгой. Поэтому целесообразно провести дополнительную проверку по критерию Колмогорова – Смирнова [18] с уровнем доверительной вероятности 0,95. В программе STATISTICA был произведен расчет критерия Колмогорова – Смирнова, результаты которого представлены на рисунке 10. В третьем столбце таблицы на этом рисунке показаны рассчитанные выборочные значения D , а в четвертом столбце показано, что все критерии нормально распределены, так как значение вероятности «р» меньше 0,1, что соответствует уровню доверительной вероятности 0,95.

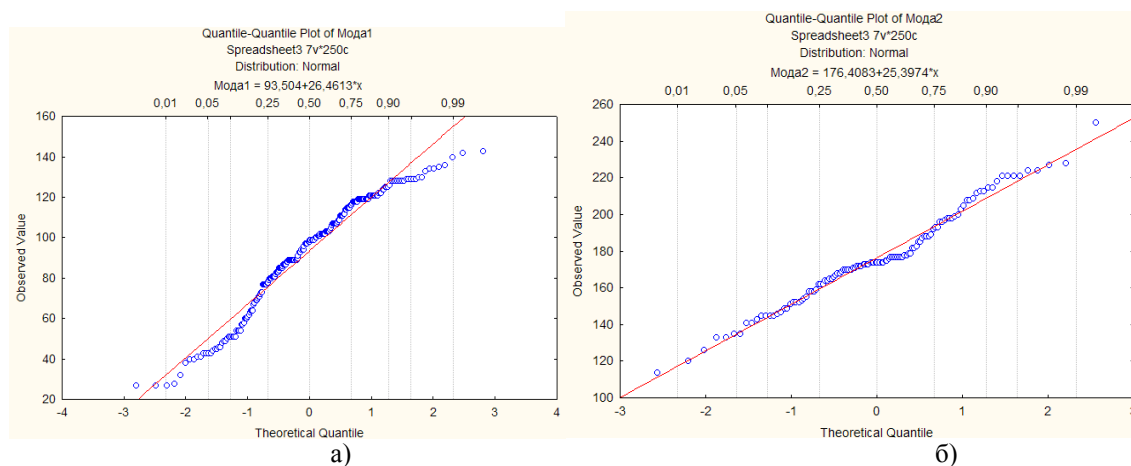


Рисунок 7 – Квантиль-квантиль график для моды: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

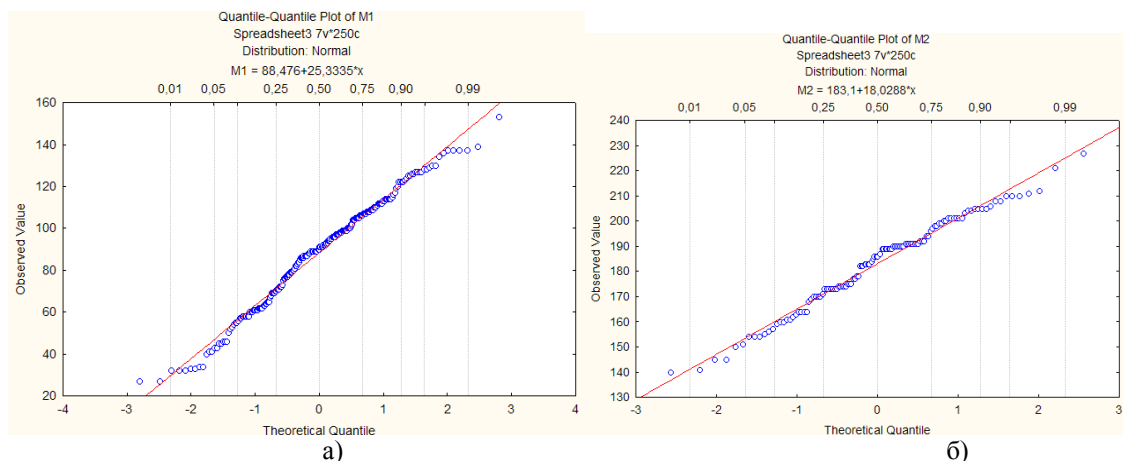


Рисунок 8 – Квантиль-квантиль график для математического ожидания: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

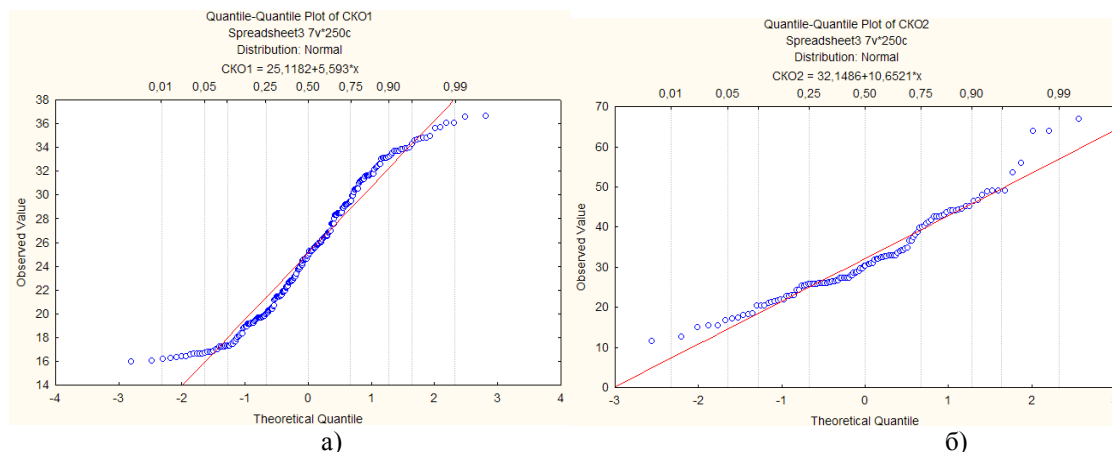


Рисунок 9 – Квантиль-квантиль график для среднеквадратического отклонения: а) для класса C_1 ; б) для класса C_2

Для того чтобы убедиться в правильности расчета по программе, необходимо сверить полученные выборочные значения D с критическим значением критерия Колмогорова – Смирнова для уровня доверительной вероятности 0,95. Расчёт критического значения проводится по формуле из [7]:

$$d = \sqrt{\frac{2}{n} \ln \frac{2}{\alpha} - \frac{1}{6n}}, \quad (3)$$

где α – уровень значимости распределения; n – объём выборки.

Variable	Tests of Normality (Spreadsheet3)		
	N	max D	Kolmogorova-Smirnova p
Мода1	250	0,081543	$p < ,10$
M1	250	0,081093	$p < ,10$
СКО1	250	0,078354	$p < ,10$
Мода2	120	0,117683	$p < ,10$
M2	120	0,111799	$p < ,10$
СКО2	120	0,116742	$p < ,10$

Рисунок 10 – Таблица нормального распределения, полученная в программе STATISTICA, по критерию Колмогорова – Смирнова

Для выборки объёмом 250 сегментов, соответствующей классу C_1 , критическое значение равно $d = 0,081921$, а для выборки объёмом 120 сегментов, относящихся к классу C_2 , $d = 0,118243$. Если $D \leq d$, то гипотеза принимается, если $D > d$, то гипотеза отвергается [9]. Поскольку все рассчитанные выборочные значения D меньше критических значений, то гипотеза принимается, следовательно, выборки распределены нормально.

На рисунке 11 изображена структурная схема классификатора сегмента.

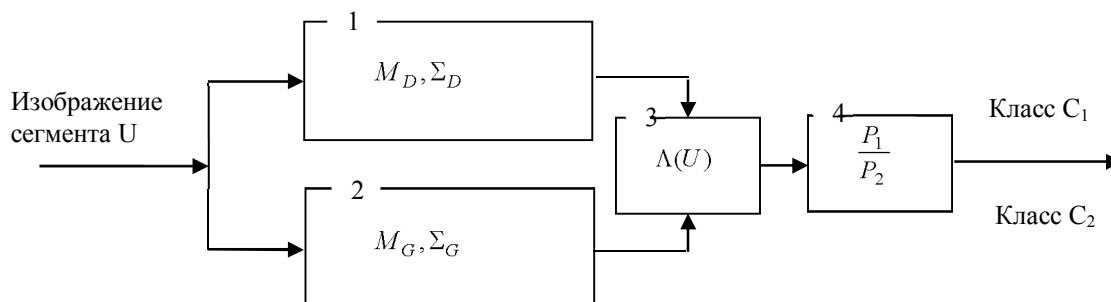


Рисунок 11 – Структурная схема классификатора сегмента

В верхнем канале (блок 1) вычисляется значение $L_D(U)$ правдоподобия классифицируемого сегмента U математической модели класса C_1 , а в нижнем канале (блок 2) – величина $L_G(U)$ правдоподобия этого сегмента математической модели класса C_2 . Далее формируется отношение правдоподобия $\Lambda_{D,G}(U)$ (блок 3), которое сравнивается с пороговым уровнем (блок 4). Если этот уровень не превышен, то принимается решение о соответствии сегмента U к классу C_2 . В противном случае классифицируемый блок не выделяется.

Для блоков в состоянии нормы формируется обучающая выборка класса C_1 , которая обозначается через D :

$$D_i = \{d_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, \ell_i, \quad (4)$$

где i – номер выборки; ℓ_i – её объём; j – номер блока в этой выборке, компоненты которого в пространстве признаков задаются вектором $d_{ij} = \{d_{ijx_1}, d_{ijx_2}, d_{ijx_3}\}$.

Аналогично, через G обозначается обучающая выборка, в которую вошли блоки, у которых имеются морфологические образования, связанные с онкологическим заболеванием, т.е. выборки класса C_2 :

$$G_i = \{g_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, r_i, \quad (5)$$

где i – номер выборки; r_i – её объём; j – номер блока в этой выборке; $g_{ij} = \{g_{ijx_1}, g_{ijx_2}, g_{ijx_3}\}$ – вектор, задающий его компоненты в пространстве признаков; n – количество обучающих выборок.

Величины n и k выбираются исходя из требования необходимой репрезентативности выборки. Количество объектов в каждой выборке должно находиться в пределах 100...300 при величине k в диапазоне 1...5.

Математические модели обучающих выборок формируются в виде плотности распределений вероятностей случайных векторов, подчиняющихся нормальному закону.

Модель выборки D_i вычисляется по формуле:

$$L_{D_i}(d_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 |\Sigma_{D_i}|}} \exp \left\{ -0.5(d_{ij} - M_{D_i})^T \cdot \Sigma_{D_i}^{-1} \cdot (d_{ij} - M_{D_i}) \right\}, \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, \ell$$

где M_{D_i} и Σ_{D_i} – средний вектор и ковариационная матрица выборки D_i соответственно.

Аналогично, модель выборки G_i вычисляется по формуле:

$$L_{G_i}(g_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 |\Sigma_{G_i}|}} \exp \left\{ -0.5(g_{ij} - M_{G_i})^T \cdot \Sigma_{G_i}^{-1} \cdot (g_{ij} - M_{G_i}) \right\}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, r$$

где g_{ij} – конкретный блок из обучающей выборки G_i ; M_{G_i} и Σ_{G_i} – средний вектор и ковариационная матрица выборки G_i ; n – количество выборок класса C_2 ; r – объём выборки.

Классификатор обеспечивает обоснованное принятие решения о том, к какому из классов C_1 или C_2 следует отнести конкретный сегмент U . В нашем распоряжении находится функция правдоподобия $L_D(d_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, \ell$ (формула (6), построенная по объединенной обучающей выборке D_i), а также функции правдоподобия $L_{G_i}(g_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, r$, построенные по обучающим выборкам G_i , полученным на блоках с патологией.

По обучающим выборкам были получены параметры моделей: средний вектор M , ковариационная матрица Σ и определитель ковариационной матрицы $|\Sigma|$ для двух математических моделей класса C_1 и C_2 .

Подставляя рассчитанные значения в формулы (6) и (7), получаем:

$$L_{D_i}(d_{ij}) = \frac{1}{2,21 \cdot 10^4} \cdot \exp \left\{ -0.5(d_{ij} - \begin{bmatrix} 93,50 \\ 88,47 \\ 25,11 \end{bmatrix})^T \cdot \begin{bmatrix} 721,078 & 463,168 & 19,272 \\ 463,168 & 642,507 & 9,572 \\ 19,272 & 9,572 & 32,200 \end{bmatrix}^{-1} \cdot (d_{ij} - \begin{bmatrix} 93,50 \\ 88,47 \\ 25,11 \end{bmatrix}) \right\}, \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, f$$

$$L_{G_i}(g_{ij}) = \frac{1}{3,85 \cdot 10^4} \cdot \exp \left\{ -0.5 \left(g_{ij} - \begin{bmatrix} 176,40 \\ 183,10 \\ 32,14 \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} 644,680 & 60,849 & 5,429 \\ 60,849 & 323,973 & 4,758 \\ 5,429 & 4,758 & 116,621 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left(g_{ij} - \begin{bmatrix} 176,40 \\ 183,10 \\ 32,14 \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (9)$$

$i=1,2,\dots,k; \quad j=1,2,\dots,f$

В соответствии с критерием максимального отношения правдоподобия решение о принадлежности к одному из классов C_1 и C_2 принимается при условии:

$$\Lambda_i(U) = \frac{L_{D_i}(U)}{L_{G_i}(U)} \geq \frac{p_1}{p_2} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

где p_1 и p_2 – априорные вероятности принадлежности примера U к первому или второму классу. Обычно полагают, что $p_1 = p_2$ и пороговое значение (10) равно единице. По обучающей выборке было установлено, что оптимальное пороговое значение равно 1,5.

В качестве примера рассмотрим классификацию неизвестного образца, представленного на рисунке 12. При помощи классификатора проведем оценку его принадлежности к классу C_1 или C_2 .

Параметры сегмента: мода – 188, математическое ожидание – 159, среднее квадратическое отклонение – 30,65.

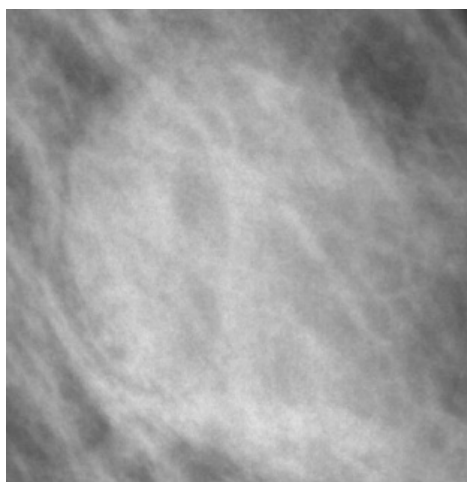


Рисунок 12 – Выборочный сегмент

Далее эти три параметра подставляются в формулы (8) и (9), которые соответствуют функциям правдоподобия для класса C_1 и C_2 . Полученные значения подставляем в формулу (10) для максимального отношения правдоподобия. Полученное значение $p = 0,0081$ соответствует классу C_2 , следовательно, в данном сегменте есть морфологическое образование.

Результаты и их обсуждение. В качестве показателей качества, характеризующих статистическую достоверность полученных критериев оценки, были выбраны следующие показатели: диагностическая чувствительность (ДЧ), диагностическая специфичность (ДС), диагностическая эффективность (ДЭ), прогностическая значимость положительных результатов (ПЗ⁺) и прогностическая значимость отрицательных результатов (ПЗ⁻) [9].

Для расчета оценки показателей качества была взята выборка объемом 100 сегментов. Все показатели рассчитывались для каждого из установленных классов состояний, где X_1 – «нет области интереса», X_2 – «есть область интереса».

Для проверки работоспособности автоматизированной системы, было использовано 50 изображений маммограмм МЖ из базы данных MIAS (фрагменты показаны на рисунках 13 и 14): из них 25 изображений в состоянии нормы и 25 изображений с морфологическими новообразованиями. В данной базе данных изображения уже классифицированы врачом-маммологом. Поэтому задача автоматизированной системы – выполнить обработку загруженного изображения и осуществить функцию классификации по одному из критериев:

- «нет области интереса» – соответствует блокам, в которые не попали морфологические образования, связанные с онкологическими заболеваниями;
- «есть область интереса» – соответствует блокам, у которых имеются морфологические образования, вызванные патологическими процессами.

Автоматизированная система должна подтвердить области с морфологическими образованиями.

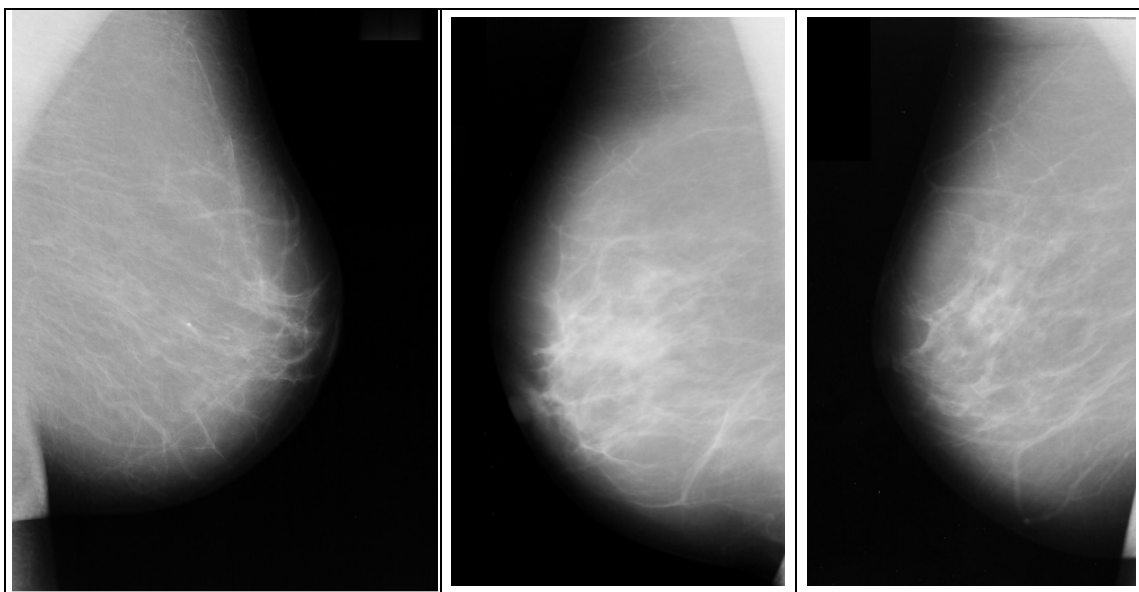


Рисунок 13 – Изображения рентгенограмм молочной железы в состоянии нормы

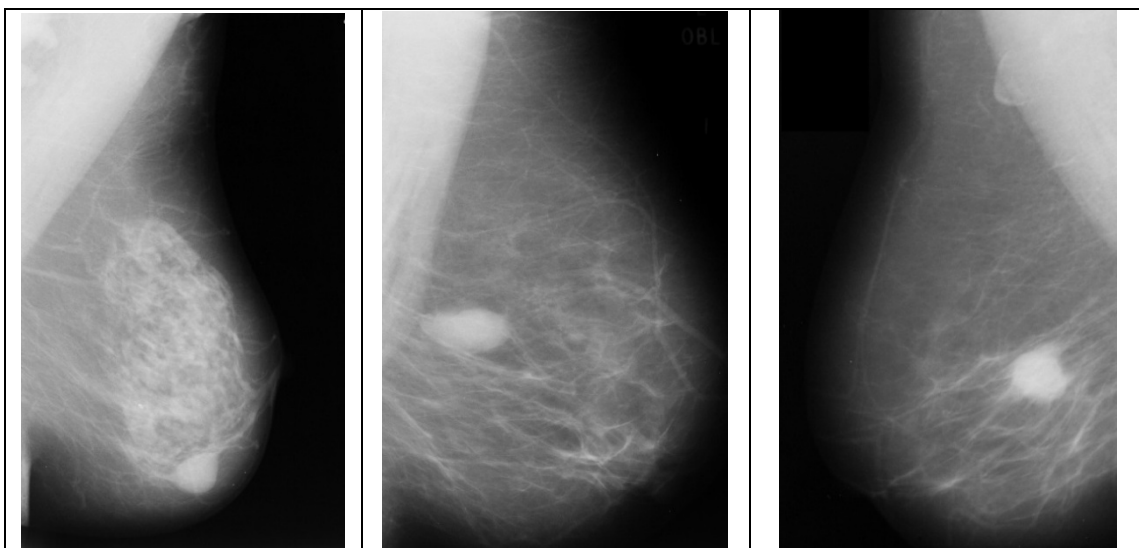


Рисунок 14 – Изображения рентгенограмм молочной железы с морфологическими новообразованиями

На рисунках 15 и 16 представлены результаты сегментирования двух маммографических изображений, которые были классифицированы по критерию «нет области интереса» и «есть область интереса».

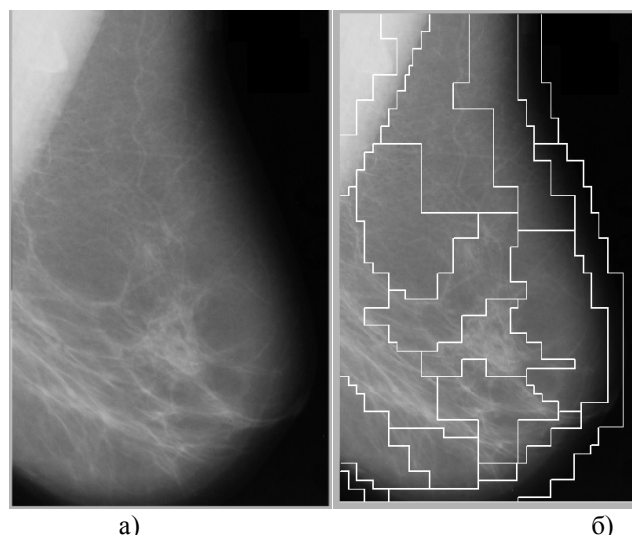


Рисунок 15 – Результат сегментирования изображения по критерию «нет области интереса»: а) исходное изображение; б) обработанное изображение первого этапа

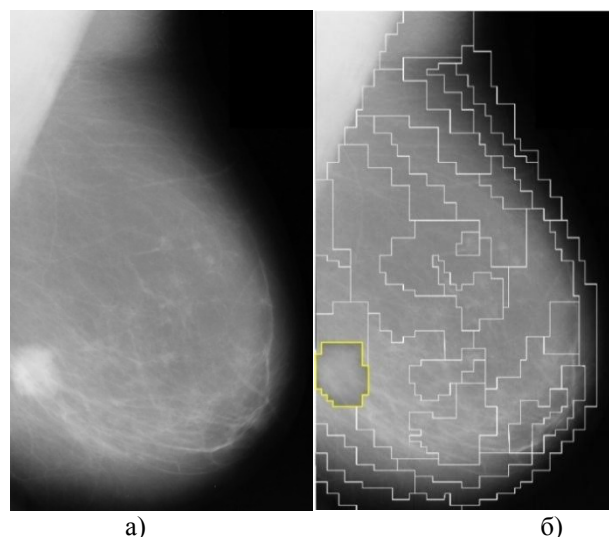


Рисунок 16 – Результат сегментирования изображения по критерию «есть область интереса»: а) исходное изображение; б) обработанное изображение первого этапа

Далее просчитаем эффективность работы автоматизированной системы. В таблице 2 указано количество отнесений положительных и отрицательных результатов классификации к одному из критериев.

Таблица 2 – Результаты контрольных испытаний автоматизированной системы

Состояние	Результат наблюдений		Всего
	Положительный	Отрицательный	
есть область интереса	21	4	25
нет области интереса	1	24	25
Всего	22	28	50

$$ДЧ = 84\%, ДС = 96\%, ПЗ^+ = 95\%, ПЗ^- = 85\%, ДЭ = 90\%.$$

Таким образом, результирующая диагностическая эффективность автоматизированной системы для сформированных контрольных изображений маммограм молочной железы составила 90 %.

Выводы. Сформированы обучающие и контрольные выборки для автоматизированной системы обработки и анализа рентгенограмм молочной железы.

В качестве текстурных характеристик классифицируемых сегментов (компонент вектора P_2) предложено использовать статистические характеристики яркости пикселей сегмента: моду (XI),

математическое ожидание (X_2), среднее квадратическое отклонение (X_3). Проведен разведочный анализ текстурных характеристик выборок двух классов: C_1 – норма и C_2 – новообразование.

Для проверки выборок на соответствие нормальному закону распределения были использованы программные модули пакета STATISTICA. Нормальный характер распределения подтверждался проверкой отдельных его компонент и следствием центральной предельной теоремы. Дополнительная проверка на нормальность распределения осуществлялась по критерию Колмогорова – Смирнова.

Предложена структура двухальтернативного классификатора сегментов рентгенограмм, содержащая два параллельных канала, на входы которых подается классифицируемый пример U . В верхнем канале вычисляется значение правдоподобия примера U математической модели класса C_1 , а в нижнем канале – величина правдоподобия этого примера математической модели класса C_2 . Далее формируется отношение правдоподобия, которое сравнивается с пороговым уровнем, равным единице. Если этот уровень не превышен, то принимается решение о соответствии примера U классу C_2 . В противном случае пример относят к классу C_1 .

Проведена экспериментальная апробация программного обеспечения автоматизированной системы классификации рентгенограмм МЖ по классам «нет области интереса» или «есть область интереса». Проведена экспериментальная проверка автоматизированной системы по классификации сегментов рентгенограмм молочной железы по классам «норма» и «патология». Выработан критерий оценки результатов классификации маммографических изображений. Эксперименты на контрольных выборках показали диагностическую эффективность по классам рентгенограмм «нет области интереса» – «есть область интереса» не ниже 90 %, а по классам сегментов «норма» – «патология» не ниже 91 %.

Библиографический список

1. Белых В. С. Разработка и исследование метода и алгоритмов для интеллектуальных систем классификации сложноструктурируемых изображений / В. С. Белых, М. А. Ефремов, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2016. – № 2 (19). – С. 12–24.
2. Дабагов А. Р. Метод и алгоритмы сегментации рентгенограмм молочной железы / А. Р. Дабагов, С. А. Филист, И. А. Малютин и др. // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : сб. статей по материалам Четвертой всерос. науч.-практ. конф. – Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. – Ч. 1. – С. 174–180.
3. Дабагов А. Р. Метод каскадной сегментации рентгенограмм молочной железы / А. Р. Дабагов, Д. С. Кондрашов, И. А. Малютин, Р. А. Томакова, С. А. Филист // Известия ЮЗГУ. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т. 9, № 1 (30). – С. 49–61.
4. Дюдин М. В. Способ выделения и классификации контуров легких на изображениях флюорограмм грудной клетки / М. В. Дюдин, С. А. Филист, П. С. Кудрявцев // Научные технологии. – 2014. – Т. 15, № 12. – С. 25–30.
5. Женщины и рак: скрининг и лечение спасают жизни. – Режим доступа: <http://www.euro.who.int/ru/health-topics/noncommunicable-diseases/cancer/news/news/2011/11/women-and-cancer-screening-and-treatment-save-lives>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 16.04.2019).
6. Жук С. В. Обзор современных методов сегментации растровых изображений / С. В. Жук // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – № 6. – С. 115–118.
7. Корниенко В. С. Математическая статистика. Решение задач по теме: «Проверка статистических гипотез»: методическая разработка / В. С. Корниенко. – Волгоград : Волгогр. гос. с.-х. акад., 2010. – 68 с.
8. Малютин И. А. Методы и алгоритмы анализа рентгенограмм грудной клетки, использующие локальные окна в задачах обнаружения патологий / И. А. Малютин, А. А. Кузьмин, О. В. Шаталова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 3 (39). – С. 131–138.
9. Садыков С. С. Алгоритм текстурной сегментации для выявления областей кисты на маммограммах / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, А. Г. Романов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2013. – № 19. – С. 50–55.
10. Томакова Р. А. Интеллектуальные технологии сегментации и классификации биомедицинских изображений / Р. А. Томакова, С. Г. Емельянов, С. А. Филист. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – 202 с.
11. Филист С. А. Анализ гистологических изображений посредством морфологических операторов, синтезированных на основе преобразования Фурье и нейросетевого моделирования / С. А. Филист, Р. А. Томакова, С. А. Горбатенко // Биотехносфера. – 2010. – № 3 (9). – С. 54–60.
12. Филист С. А. Гибридные интеллектуальные модели для сегментации изображений рентгенограмм грудной клетки / С. А. Филист, Р. А. Томакова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин // Медицинская техника. – 2017. – № 5. – С. 41–45.
13. Филист С. А. Метод классификации сложноструктурируемых изображений на основе самоорганизующихся нейросетевых структур / С. А. Филист, Р. А. Томакова, О. В. Шаталова, А. А. Кузьмин, К. Д. А. Кассим // Радиопромышленность. – 2016. – № 4. – С. 57–65.
14. Филист С. А. Нечеткая сетевая модель морфологического оператора для формирования границ сегментов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, В. В. Руденко // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2011. – № 1 (96). – С. 188–195.

15. Филист С. А. Программное обеспечение автоматической классификации рентгенограмм грудной клетки на основе гибридных классификаторов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, И. В. Дураков // Экология человека. – 2018. – № 36. – С. 59–66.
16. Филист С. А. Развитие методологии бустинга для классификации флюорограмм грудной клетки / С. А. Филист, П. С. Кудрявцев, А. А. Кузьмин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2016. – № 9. – С. 10–15.
17. Филист С. А. Клеточные процессоры в классификаторах многоканальных изображений / С. А. Филист, Р. А. Томакова, А. Н. Брежнева, И. А. Малыгина, В. А. Алексеев // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 45–52.
18. Чернова Н. И. Математическая статистика : учебное пособие / Н. И. Чернова. – Новосибирск : Новосибир. гос. ун-т, 2007. – 148 с.
19. Mammographic Image Analysis Society (MIAS). – Режим доступа: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/250394>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 16.04.2019).
20. The mini-MIAS database of mammograms. – Режим доступа: <http://peipa.essex.ac.uk/info/mias.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 16.04.2019).

References

1. Belykh V. S., Efremov M. A., Filist S. A. Razrabotka i issledovanie metoda i algoritmov dlya intellektualnykh sistem klassifikatsii slozhnostrukturiruemyykh izobrazheniy [Development and research of a method and algorithms for intelligent classification systems for complexly structured images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering], 2016, no. 2 (19), pp. 12–24.
2. Dabagov A. R., Filist S. A., Malyutina I. A. et al. Metod i algoritmy segmentatsii rentgenogrammm molochnoy zhelezy [Method and algorithms for segmentation of breast radiographs]. *Iskusstvennyy intellekt v reshenii aktualnykh socialnykh i ekonomicheskikh problem XXI veka : sbornik statey po materialam Chetvertoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Artificial Intelligence in Solving Actual Social and Economic Problems of the 21st Century : Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific-Practical Conference]. Perm, Perm State National Research University, 2019, Part 1, pp. 174–180.
3. Dabagov A. R., Kondrashov D. S., Malyutina I. A., Tomakova R. A., Filist S. A. Metod kaskadnoy segmentatsii rentgenogrammm molochnoy zhelezy [The method of cascading segmentation of x-rays of the mammary gland]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering], 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 49–61.
4. Dyudin M. V., Filist S. A., Kudryavtsev P. S. Sposob vydeleniya i klassifikatsii konturov legkikh na izobrazheniyakh flyuorogrammm grudnoy kletki [The method of isolation and classification of the contours of the lungs on the images of chest X-ray]. *Naukoemkie tekhnologii* [High Technologies], 2014, vol. 15, no. 12, pp. 25–30.
5. *Zhenshchiny i rak: skринing i lechenie spasayut zhizni* [Women and cancer: screening and treatment save lives]. Available at: <http://www.euro.who.int/ru/health-topics/noncommunicable-diseases/cancer/news/news/2011/11/women-and-cancer-screening-and-treatment-save-lives> (accessed 16.04.2019).
6. Zhuk S. V. Obzor sovremennykh metodov segmentatsii rastroykh izobrazheniy [Overview of modern raster image segmentation techniques]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd State Technical University], 2009, no. 6, pp. 115–118.
7. Kornienko V. S. *Matematicheskaya statistika. Reshenie zadach po teme: «Proverka statisticheskikh gipotez»* [Math statistics. Problem solving on the topic: «Testing statistical hypotheses»]. Volgograd, 2010. 68 p.
8. Malyutina I. A., Kuzmin A. A., Shatalova O. V. Metody i algoritmy analiza rentgenogrammm grudnoy kletki, ispolzuyushchie lokalnye okna v zadachah obnaruzheniya patologiy [Methods and algorithms for the analysis of chest radiographs using local windows in the detection of pathologies]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 3 (39), pp. 131–138.
9. Sadykov S. S., Bulanova Yu. A., Romanov A. G. Algoritmy teksturnoy segmentatsii dlya vyyavleniya oblastey kisty na mammogrammmakh [Texture segmentation algorithm for detecting cyst areas in mammograms]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh* [Algorithms, methods and data processing systems], 2013, no. 19, pp. 50–55.
10. Tomakova R. A., Emelyanov S. G., Filist S. A. *Intellektualnye tekhnologii segmentatsii i klassifikatsii biomeditsinskiykh izobrazheniy* [Intelligent technologies for segmentation and classification of biomedical images]. Kursk, 2012. 202 p.
11. Filist S. A., Tomakova R. A., Gorbatenko S. A. Analiz gistologicheskikh izobrazheniy posredstvom morfologicheskikh operatorov, sintezirovannykh na osnove preobrazovaniya Fure i neyrosetevogo modelirovaniya [Analysis of histological images using morphological operators synthesized based on Fourier transform and neural network modeling]. *Biotekhnosfera* [Biotechnosphere], 2010, no. 3 (9), pp. 54–60.
12. Filist S. A., Tomakova R. A., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F. Gibridnye intellektualnye modeli dlya segmentatsii izobrazheniy rentgenogrammm grudnoy kletki [Hybrid intelligent models for segmentation of chest radiographs]. *Meditsinskaya tekhnika* [Biomedical Engineering], 2017, no. 5, pp. 41–45.
13. Filist S. A., Tomakova R. A., Shatalova O. V., Kuzmin A. A., Kassim K. D. A. Metod klassifikatsii slozhnostrukturiruemyykh izobrazheniy na osnove samoorganizuyushchikhsya neyrosetevykh struktur [Classification method for complexly structured images based on self-organizing neural network structures]. *Radiopromyshlennost* [Radio Industry], 2016, no. 4, pp. 57–65.

14. Filist S. A., Tomakova R. A., Rudenko V. V. Nechetkaya setevaya model morfologicheskogo operatora dlya formirovaniya granits segmentov [Fuzzy network model of a morphological operator for forming segment boundaries]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika* [Scientific Sheets of BelSU. Series. History. Political Science. Economy. Informatics], 2011, no. 1 (96), pp. 188–195.
15. Filist S. A., Tomakova R. A., Durakov I. V. Programmnoe obespechenie avtomaticheskoy klassifikatsii rentgenogramm grudnoy kletki na osnove gibridnykh klassifikatorov [Hybrid Classification Chest Radiography Software]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology], 2018, no. 36, pp. 59–66.
16. Filist S. A., Kudryavtsev P. S., Kuzmin A. A. Razvitie metodologii bustinga dlya klassifikatsii flyuorogramm grudnoy kletki [Development of a boosting methodology for the classification of chest fluorograms]. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics], 2016, no. 9, pp. 10–15.
17. Filist S. A., Tomakova R. A., Brezhneva A. N., Malyutina I. A., Alekseev V. A. Kletochnye protsessory v klassifikatorakh mnogokanalnykh izobrazheniy [Cellular Processors in Multichannel Image Classifiers]. *Radiopromyshlennost* [Radio Industry], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 45–52.
18. Chernova N. I. *Matematicheskaya statistika* [Math statistics]. Novosibirsk, 2007. 148 p.
19. *Mammographic Image Analysis Society (MIAS)*. – Available at: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/250394> (accessed 16.04.2019).
20. *The mini-MIAS database of mammograms*. – Available at: <http://peipa.essex.ac.uk/info/mias.html> (accessed 16.04.2019).

УДК 621.391 + 004.021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНХРОННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В MAC-ПРОТОКОЛАХ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Статья поступила в редакцию 27.10.2019, в окончательном варианте – 12.11.2019.

Подольцев Виктор Владимирович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, аспирант, e-mail: pvv_001@mail.ru

В статье рассмотрены основные области применения псевдослучайных последовательностей (ПСП), сформулированы основные критерии оценки методов синхронной обработки информации в ПСП-ориентированных MAC (media access control)-протоколах множественного доступа, проведен системный анализ известных методов синхронизации ПСП. Целью данной работы является обоснование необходимости повышения точности обработки синхронизирующей информации в ПСП-ориентированных MAC-протоколах систем управления и обработки информации, использующих на подуровне доступа ПСП. Показано, что рассмотренные методы, как правило, разрабатываются для реализации на физическом уровне и фактически сложны или нереализуемы на подуровне доступа к среде передачи MAC, где протоколы множественного доступа оперируют с уже принятыми и декодированными битовыми последовательностями. Рассмотрена синхронизация ПСП по методу Уорда и его модификациям, которые можно реализовать на подуровне доступа к среде передачи MAC. При синхронизации ПСП предложен метод мажоритарного декодирования m -последовательности. Его использование повышает вероятность синхронизации ПСП и требует меньших аппаратных затрат. Данный метод может быть легко реализован в системах обработки информации с ПСП-ориентированными протоколами множественного доступа.

Ключевые слова: синфазная обработка информации, среднее время поиска, вероятность правильной синхронизации, вероятность ложной синхронизации, методы синхронизации ПСП, метод мажоритарной обработки информации, метод Уорда

SYSTEM ANALYSIS OF METHODS OF SYNCHRONOUS PROCESSING OF INFORMATION IN MAC PROTOCOLS OF MULTIPLE ACCESS USING PSEUDORANDOM SEQUENCES

The article was received by the editorial board 27.10.2019, in the final version – 12.11.2019.

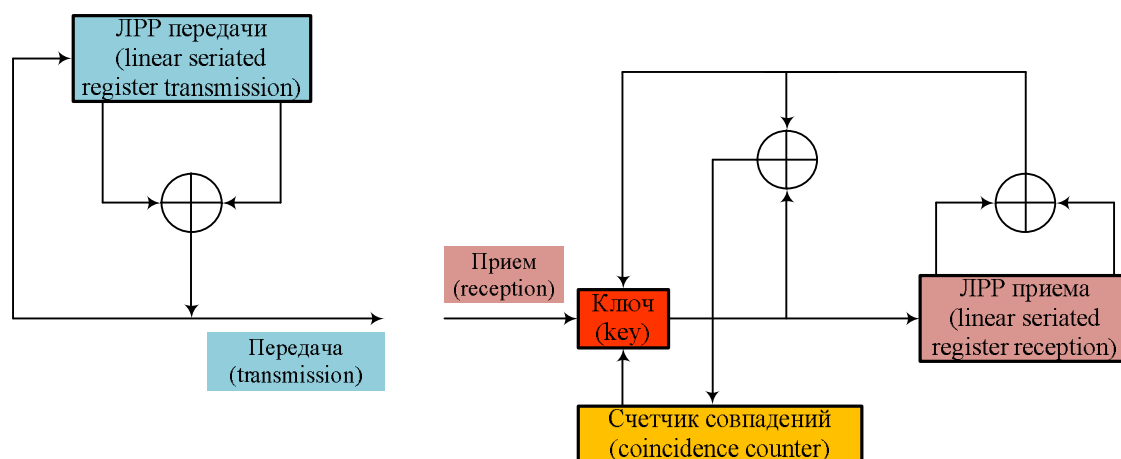
Podoltsev Viktor V., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: pvv_001@mail.ru

The article considers the main areas of application of pseudorandom sequences (PSP), formulates the main criteria for evaluating methods of synchronous information processing in PSP-oriented MAC (media access control) multiple access protocols, and carries out a system analysis of known methods for synchronizing PSP. The aim of this

work is to substantiate the need to improve the accuracy of processing synchronizing information in the PSP-oriented MAS protocols of control and information processing systems that use the PSP at the access level. It is shown that the considered methods are usually developed for implementation at the physical level and are actually complex or unrealizable at the sub-level of access to the MAC transmission medium, where the multiple access protocols operate with already received and decoded bit sequences. The synchronization of the PSP by the Ward method and its modifications, which can be implemented at the sub-level of access to the transmission medium of the MAC. When synchronizing memory bandwidth, a method for majority decoding of the m-sequence is proposed, the use of which increases the likelihood of synchronizing the memory bandwidth and requires less hardware. This method can be easily implemented in information processing systems with PSP-oriented multiple access protocols.

Key words: common-mode information processing, average search time, probability of correct synchronization, probability of false synchronization, PSP synchronization methods, majority information processing method, Ward method

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Проблема синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП) неотъемлемо связана с развитием технологий распределенного спектра (spread spectrum) [19]. Не углубляясь в историю развития теории, отметим, что «возраст» научных изысканий в этой области составляет уже более шестидесяти лет [16]. Несмотря на достаточно солидный срок, проблема синхронизации ПСП до сих пор остается актуальной. Во-первых, это связано с широкой коммерциализацией технологий распределенного спектра, начатой еще в конце 70-х гг. [16] с внедрения систем мобильной телефонной связи, и продолжающимся их развитием с целью повышения эффективности. Во-вторых, актуальность проблемы можно связать с появлением передовых методов множественного доступа, значительно повышающих производительность МАС-протоколов за счет применения ПСП.

Целью данной работы является обоснование необходимости повышения точности обработки синхронизирующей информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах систем управления и обработки информации, использующих на подуровне доступа ПСП.

Общая характеристика проблематики статьи. В настоящее время важную роль в развитии государства играют информационные технологии, представляющие собой большой класс активных сложных технических систем обработки информации и управления, эффективность функционирования которых зависит от их устойчивости к внешним злонамеренным воздействиям и точности обработки циркулирующей в них информации.

При этом одним из наиболее перспективных направлений развития информационных технологий при переходе к цифровой экономике является использование в информационных системах обработки информации ПСП-ориентированных МАС-протоколов.

За последние несколько десятилетий использование информационных технологий шагнуло далеко вперед. Повсеместное внедрение широкополосного доступа (ШПД) в интернет стало обыденным и уже не кажется чем-то далеким и недоступным для рядового пользователя. На смену только недавно развернутым в России сетям четвертого поколения (4G) скоро придут сети пятого поколения (5G). Данный факт говорит о том, что потребность в высокоскоростных технологиях ШПД с каждым годом только увеличивается, и обычному пользователю уже недостаточно той пропускной способности, которой обладали сети третьего и четвертого поколений. Таким образом, уже сейчас требуется повышение надежности и пропускной способности сетей ШПД для обработки растущих потоков информации.

Это подталкивает исследователей и разработчиков к увеличению производительности сетей за счет применения продвинутых технологий множественного доступа к среде передачи и обработки информации на основе использования ПСП, так называемых МАС-протоколов множественного доступа.

Некоторые из высокопроизводительных МАС-протоколов базируются на идее применения числовых последовательностей для защиты и контроля доступа к среде передачи и обработки информации. В таких протоколах используются как случайные числовые последовательности, так и псевдослучайные на основе генераторов m -последовательностей.

Известно, что при использовании в системах обработки информации и управления псевдослучайных последовательностей возникает потребность в обеспечении их надежной синхронизации. К настоящему времени синхронизации ПСП посвящено множество работ. Уже разработано множество различных способов синхронизации ПСП. Как правило, разработанные методы ориентированы на синхронизацию ПСП на физическом уровне, и их реализация на подуровне доступа к среде обработки информации нецелесообразна или невозможна из-за повышения вычислительной сложности и использования специфических методов обработки информации, характерных для физического уровня. Среда обработки информации при передаче оперирует дискретной бинарной последовательностью, называемой кадром (frame). Для синхронизации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах могут применяться традиционные методы, например, метод последовательной оценки Уорда, но, несмотря на простоту реализации, данный метод может быть недостаточно эффективен при синхронизации, например, апериодических ПСП.

Методы обеспечения синфазной обработки информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах множественного доступа. Базовыми методами расширения спектра являются метод расширения прямой последовательностью DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) и метод расширения скачкообразной перестройкой частоты FHSS (Frequency Hop Spread Spectrum) [16, 8]. Помимо DSSS и FHSS есть и менее распространенные методы: метод расширения спектра с переключением временных интервалов THSS (Time Hop Spread Spectrum) и смешанные методы [8]. В системах расширенного спектра для успешного приема сигнала приемник должен обладать синхронизированной копией расширяющего или кодового сигнала [8]. Обычно процесс синхронизации ПСП реализуется в виде двух последовательных этапов [16]: поиском кода (acquisition) и слежением (tracking). На первом этапе производится грубое измерение необходимых параметров и обеспечивается предварительная оценка. На втором этапе выполняются точные частотно-временные оценки, которые в дальнейшем используются местным опорным генератором для согласования сжимающего сигнала с принятым расширяющим кодом.

Как уже было сказано выше, проблема синхронизации актуальна для некоторых ПСП-ориентированных МАС-протоколов. Например, протоколы SYN-MAC [25] и MFMAC [21] используют числовые последовательности для обеспечения механизма контроля доступа к среде обработки информации.

Основой протокола SYN-MAC [25] является так называемый «бинарный обратный отсчет», когда доступ к среде обработки или высший приоритет получает та станция, которая имеет наибольшее присвоенное ей (например, менеджером сети) двоичное число. Такой подход обеспечивает значительное повышение производительности МАС (более 90 %).

Протокол MFMAC [21] использует апериодическую m -последовательность для контроля доступа к среде обработки, распределение фаз которой обеспечивает требуемые показатели QoS (quality of service). Механизм доступа, в отличие от протокола SYN-MAC, реализуется за счет рекуррентных свойств m -последовательности, когда доступ получает та станция, МАС-адрес (фаза m -последовательности, выделенная станции) которой совпадает с текущей фазой локального генератора ПСП, синхронизированного с другими станциями сети (маркерное широкополосное резервирование [21]). Данный протокол ориентирован на применение в перспективных АТМ-подобных (asynchronous transfer mode – режим асинхронной передачи) [22], гибридных, мульти-сервисных сетях [25] с полностью распределенной архитектурой [22], предназначенных для труднодоступных, удаленных и малонаселенных территорий.

На рисунке 1 изображено концептуальное представление сети с полностью распределенной архитектурой.

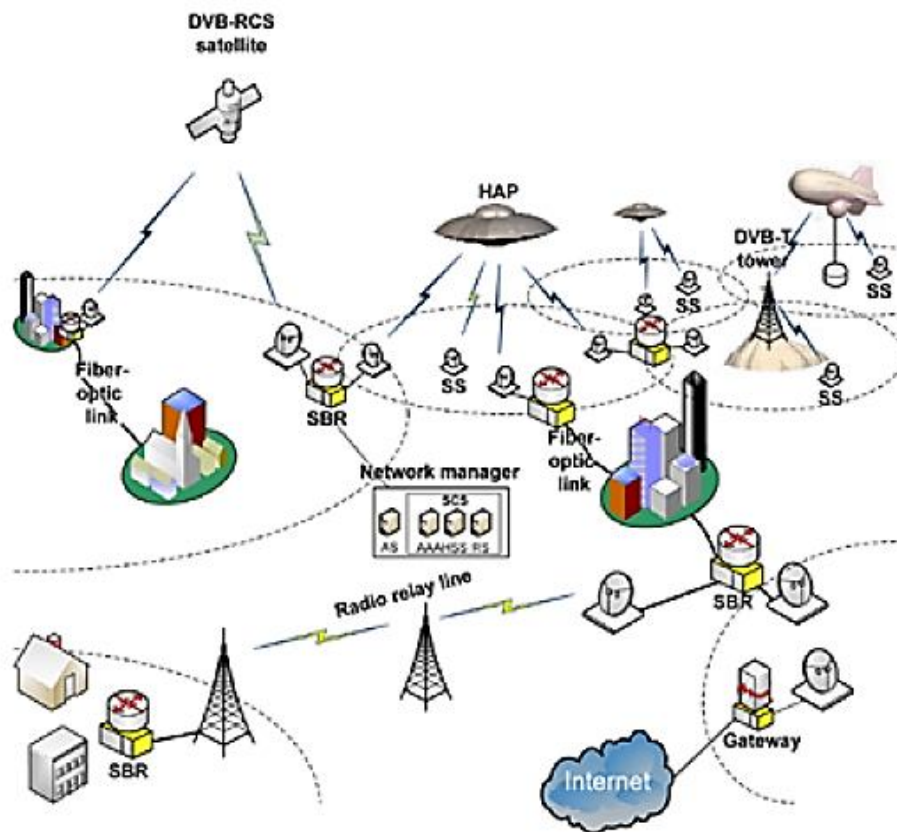


Рисунок 1 – Концептуальное представление сети с распределенной архитектурой [8]

В ее состав входит следующее:

- транспарентный (прозрачный) ретранслятор, устанавливаемый или на спутник, или на воздушную платформу HAP [14];
- мост-маршрутизаторы (броутеры – SBR) с функцией селекции данных;
- шлюз (gateway);
- серверы управления (network manager).

Сеть одновременно выполняет функции сети доступа и транспортной сети. Такая архитектура предусматривает объединение различного рода беспроводных и проводных сетей на базе единого протокола доступа к среде MAC. Очевидно, что для того чтобы такая сеть могла эффективно работать, требуется надежная синхронизация локальных генераторов m -последовательности.

Отметим, что не зря был сделан акцент на технологии построения сетей с распределенной архитектурой, так как потенциально такие сети могут стать дешевой альтернативой четвертому (4G) и пятому (5G) поколениям беспроводных сетей на малонаселенных и труднодоступных территориях [22]. Но для этого требуется исследование и решение некоторых актуальных задач, в частности повышение точности синхронизации.

Существуют различные методы поиска (синхронизации) ПСП и каждый из них имеет свои особенности:

- сложность реализации;
- помехозащищенность;
- время вхождения в синхронизм.

Все особенности зависят от области применения метода и условий его работы. Так, любая синхронизация ПСП подвергается воздействию различного рода деструктивных помех, ухудшающих точность обработки синхронизирующей информации. В результате при начальном вхождении системы в синхронизм на приемной стороне в синхросигнале возникают ошибки, которые, как правило, повышают время синхронизации. К тому же, зачастую в системах управления используются аperiodические m -последовательности, синхронизация которых чувствительна к воздействию помех из-за большой длины линейного рекуррентного регистра (ЛРР) [16].

Таким образом, область применения системы обработки информации и управления определяет требования к устройствам синхронизации, которые должны формулироваться исходя из

наихудшего случая [7]. Рассмотрим основные критерии оценки методов синхронизации и требования, предъявляемые к синхронизации ПСП.

Основные требования и критерии оценки методов синхронной обработки информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах множественного доступа. Базовыми критериями оценки методов синхронизации ПСП являются [11, 16]:

- среднее время поиска;
- вероятность правильной синхронизации;
- аппаратная или вычислительная сложность;
- вероятность ложной синхронизации.

Основным требованием [14], предъявляемым к системам синхронизации, в частности к системам, использующим длинные ПСП, является требование *быстрого вхождения в синхронизм*. Время вхождения системы в синхронизм обычно оценивается через *среднее время поиска* T_{cp} [8, 12]. Данный параметр зависит от самого алгоритма синхронизации, а также от вероятности правильного приема и обработки синхросигнала.

Для систем обработки информации с последовательным поиском, особенности которого будут рассмотрены чуть позже, и расширением спектра прямой последовательностью среднее время поиска, согласно [8], можно рассчитать по формуле:

$$T_{cp} = \frac{(2 - P_D)(1 + KP_{ЛС})}{P_D} (M_c \lambda T_c), \quad (1)$$

где λT_c – интервал поиска; P_D – вероятность правильного детектирования; M_c – количество элементарных сигналов; $P_{ЛС}$ – вероятность ложной синхронизации; $K \gg 1$.

Для систем обработки информации с синхронизацией по методу Уорда [14] среднее время поиска можно оценить через среднее время возвращения серии успехов [10]:

$$T_{cp} = \frac{1 - q^k}{Pq^n U}, \quad (2)$$

где k – число успехов (длина «зачетного отрезка»); U – скорость передачи, P – вероятность деструктивной ошибки, $q = 1 - P$ – вероятность правильного приема одного чипа.

Важным требованием, предъявляемым к системе синхронизации, является ее *помехоустойчивость*. Критерием оценки помехоустойчивости системы синхронизации является *вероятность правильного приема* P_{np} или *вероятность правильной синхронизации*. Чем выше эта вероятность, тем выше производительность системы, тем быстрее она войдет в синхронизм в условиях повышения вероятности деструктивных ошибок из-за воздействия помех естественной или организованной структуры. Вероятность правильной синхронизации P_{np} , как правило, зависит от применяемых сигналов и метода приема. Не углубляясь в описание методов приема, отметим, что в некоторых системах синхронизации ПСП помимо традиционных схем используются схемы с «мягким» принятием решений (RSSE – Recursive Soft Sequential Estimation) [24] и прием с нелинейной фильтрацией псевдослучайного сигнала, позволяющие значительно повысить вероятность правильного приема ПСП.

В системах обработки информации и управления с шумоподобными сигналами очень часто используются длинные m -последовательности. Эти же последовательности используются в некоторых МАС-протоколах. Длинные m -последовательности оказываются наиболее чувствительны к деструктивным ошибкам, что естественно, так как с увеличением длины принимаемой последовательности повышается вероятность появления или возникновения ошибки с течением времени. При вхождении же в синхронизм, например, по методу Уорда [14] требуется принять k символов ПСП, где k – длина линейного рекуррентного регистра [7]. Соответственно, при одной и той же вероятности деструктивной ошибки увеличение длины ЛРР повышает вероятность неприема ПСП в сравнении с системой синхронизации, где длина ЛРР меньше.

Немаловажным требованием к системе синхронизации является *простота реализации*, критерием оценки которой является *аппаратная или вычислительная сложность*. Так существуют методы синхронизации ПСП, использующие многоканальный корреляционный приемник, в котором на каждом канале в качестве опорного сигнала используются все фазовые сдвиги синхропоследовательности [19]. Известны также оптимальные методы приема [19], которые на сегодняшний день широко используются в спутниковых системах для синхронизации коротких ПСП. Для повышения вероятности приема ПСП в таких системах производится прием всего периода последовательности. Очевидно, что в первом и во втором случае аппаратная сложность резко возрастает

при синхронизации длинных ПСП. В первом случае значительно увеличивается количество корреляторов, а во втором – количество ячеек памяти.

Вероятность ложной синхронизации P_{λ} является еще одним критерием оценки методов синхронизации. Ложная синхронизация возникает тогда, когда система переходит в режим автономной работы в случае приема синхросигнала с ошибкой и, по сути, является вероятностью ошибочного приема ПСП.

Помимо вероятности ложной синхронизации используется еще одна вероятностная оценка, не представленная выше – вероятность пропуска синхропоследовательности (СП) P_{np} . Пропуск СП может произойти в том случае, когда СП была принята правильно, загружена в генератор ПСП и при генерации следующей фазы ПСП не совпала с фазой, поступающей ПСП. Тогда схема обработки информации принимает решение об ошибке и продолжает поиск синхропоследовательности.

Очевидно, что эти вероятности составляют полную группу событий [11]:

$$P_{nn} + P_{np} + P_{\lambda} = 1. \quad (3)$$

Эти вероятности зависят как от заданных величин (длина ЛРР), так и от случайных (распределение ошибок). Для количественной оценки цикловой синхронизации достаточно использовать только два параметра: среднее время вхождения в синхронизм T_{cp} и вероятность правильного приема P_{nn} [11].

Теперь, зная критерии оценки, можно перейти к рассмотрению известных на сегодняшний день методов синхронизации ПСП, а также оценить возможность их применения в системах обработки информации с ПСП-ориентированными МАС-протоколами множественного доступа.

Системный анализ известных методов синхронизации ПСП. Наиболее известные методы синхронизации можно разделить на следующие группы [16, 11, 24, 19]:

- последовательный поиск;
- полихотомический поиск;
- беспоисковая синхронизация;
- методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов.

Методы *последовательного поиска* фазы принятого сигнала или последовательности скачков частоты позволяют снизить сложность, размер и стоимость разрабатываемой системы обработки информации. Для реализации данных методов синхронизации достаточно иметь единичный коррелятор или согласованный фильтр [11]. При последовательном поиске в каждый момент времени анализируется только одна точка области неопределенности, т.е. вычисляется единственная корреляция наблюдения и локальной сигнальной копии, характеризующейся некоторыми конкретными значениями сдвига по времени и частоте. Затем величина корреляции анализируется с целью принятия решения об истинности или ложности ячейки [16]. На рисунке 2 изображена блок-схема процесса последовательного поиска для системы с расширением спектра прямой последовательностью DSSS.

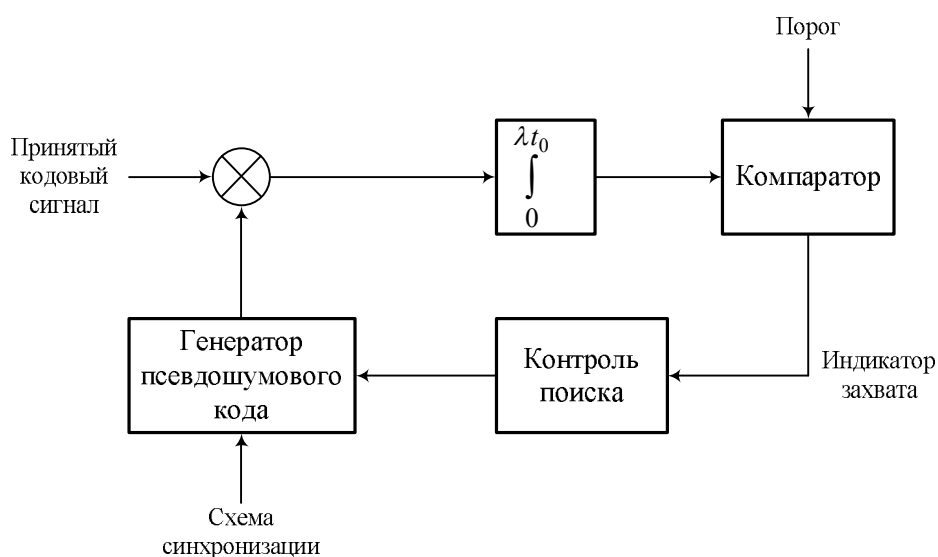


Рисунок 2 – Блок-схема процесса последовательного поиска для DSSS [8]

К методам последовательного поиска можно отнести: поиск с задержанным решением, методы последовательного анализа и методы многоэтапных процедур поиска. В работе [23] рассматривается разновидность последовательного поиска с двойным задержанным решением на базе цифрового согласованного фильтра DMF (digital Matched-filter), дающая некоторый выигрыш во времени синхронизации при возрастании деструктивных ошибок.

Как известно, изменение порога решающей схемы в системах с задержанным решением позволяет скорректировать среднее время синхронизации с целью его минимизации [23]. Данная проблема рассматривается в работе [15], в которой предлагается метод последовательного поиска с автоматическим управлением величиной порога. Таким образом, достигается минимум среднего времени синхронизации ПСП.

Однако, как показано в работах [7, 11], последовательный поиск эффективен при достаточно высоком отношении сигнал/шум.

Полихотомический метод – метод синхронизации, в процессе которого область неопределенности делится на части, и точки области неопределенности исследуются индивидуально. Определив, в какой части области неопределенности предположительно находится точка синхронизации, предполагаемая область опять делится на части. Полихотомический метод является естественным обобщением принципа дихотомии при делении области неопределенности на q частей [16]. Процедура дихотомии же сводится к разделению зоны неопределенности на две равные половины. Для дихотомии могут использоваться последовательности быстрого захвата Стиффлера, которые наилучшим образом согласуются с этой процедурой [16]. Численные оценки показывают, что выигрыш во времени поиска, сопровождающий использование данных кодов, может составить более сотни раз [16]. Опять же, отметим, что при возрастании деструктивных ошибок полихотомический метод проигрывает методам, основанным на алгебраических особенностях синхросигналов [11].

Метод беспойсковой синхронизации реализуется с помощью многоканального корреляционного приемника, в котором в качестве опорного сигнала используются все фазовые сдвиги синхропоследовательности [11]. Время поиска при этом методе равно периоду СП. Недостатком метода является сложность реализации многоканального коррелятора при увеличении длины последовательности N .

В зарубежной литературе для беспойсковой синхронизации широко используется термин «параллельный поиск». Существуют гибридные методы поиска, которые представляют собой комбинацию схем параллельного и последовательного поиска. Так, ускорение поиска можно осуществить за счет применения нескольких параллельных корреляторов, каждый из которых работает автономно и сканирует отдельную часть области неопределенности. В этом случае исходная область неопределенности просто разбивается на несколько подобластей, каждая из которых исследуется отдельным коррелятором [16]. Соответственно, время последовательного поиска уменьшается во столько раз, сколько используется параллельных корреляторов. При увеличении числа параллельных корреляторов до числа всех сдвигов фаз, параллельно-последовательный поиск становится полностью параллельным. Данная возможность находит широкое применение в реальном оборудовании и особенно эффективна при использовании дискретных компонентов, которые обязательно присутствуют в приемнике, но, с другой стороны, обычно свободны во время процедуры поиска [16]. В работе [24], а также в других работах, методы параллельного поиска рассматриваются для применения в системах обработки информации с многочастотными сигналами MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access).

Методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов, базируются на декодировании кода, словами которого являются все циклические перестановки исходной последовательности. Среди данных методов можно выделить неполные алгоритмы, которые позволяют восстановить кодовое слово по правильно принятым отдельным кодовым символам или отрезку СП [14]. Например, при приеме M -последовательности, генерируемой k -разрядным ЛПР, для синхронизации системы достаточно безошибочно принять сегмент последовательности из k символов и использовать его в качестве начального заполнения местного опорного генератора. Отрезок из $k+m$ -символов обычно называют «зачетным отрезком», где m – порог переключения приемного датчика ПСП в автономный режим работы, соответственно, метод синхронизации – синхронизацией по «зачетному отрезку» (ЗОТ). Более известное название метода, в частности в зарубежной литературе, – метод Уорда [14]. Чтобы увеличить вероятность синхронизации, используются так называемые мажоритарные способы синхронизации, обеспечивающие исправление ошибок в зачетном отрезке. Алгебраические методы синхронизации при умеренных шумах могут сократить время поиска по сравнению с шаговым методом.

Синхронизация ПСП по методу Уорда (ЗОТ) изображена на рисунке 3.

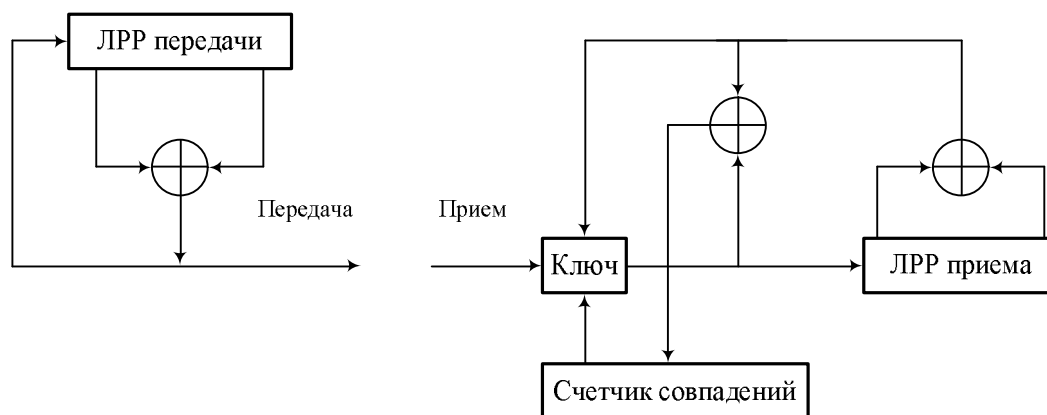


Рисунок 3 – Синхронизация по методу Уорда (ЗОТ) [11]

На схеме представлены ЛРР передачи, генерирующий ПСП в канал и ЛРР приема с разомкнутой петлей обратной связи, которая замыкается после того, как счетчик совпадений насчитает подряд « m » совпадений. Как правило, порог переключения системы в автономный режим работы « m » выбирается не более величины « k » – старшей степени порождающего полинома [11].

В работе [11] показано, что среди всех рассмотренных групп, только методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов, в частности метод ЗОТ, позволяют при малом отношении сигнал/шум в полосе принимаемого сигнала ($H^2 < 1$) войти в синхронизм в течение одного периода. Другие методы, даже при небольших вероятностях деструктивных ошибок ($H^2 = 2$), для вхождения в синхронизм требуют более десятка периодов СП.

Существуют различные модификации метода Уорда. Разновидность метода последовательной оценки Уорда [22], которая может применяться в одночастотных и многочастотных (MC-CDMA) системах обработки информации, представлена на рисунке 4.

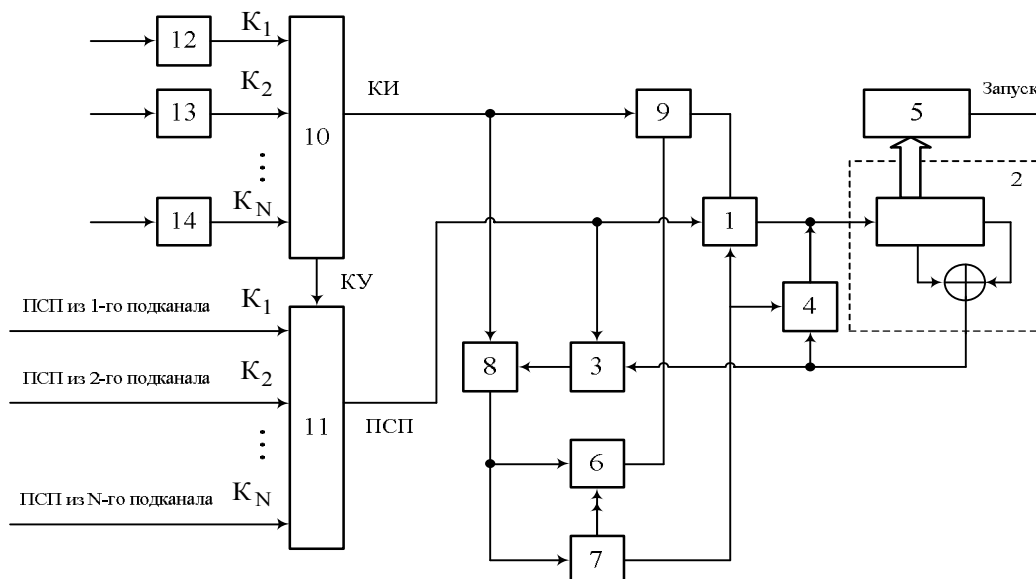


Рисунок 4 – Структурная схема устройства синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами

Метод, реализованный в качестве устройства синхронизации, предотвращает вероятность преждевременного перехода устройства в режим приема синхропосылки при возрастании организованных помех в системах обработки информации с многочастотными сигналами, обеспечивает защиту от ложной синхронизации ПСП при возрастании деструктивных ошибок и позволяет повысить точность определения факта потери синхронизации ПСП. Устройство разработано для применения на физическом уровне.

В работе [24] для улучшения эффективности последовательного поиска при возрастании деструктивных ошибок предлагается использовать схемы с «мягким» принятием решений RSSE

(Recursive Soft Sequential Estimation). Предложенный метод синхронизации дает определенный выигрыш в сравнении с традиционными схемами синхронизации.

В работе [11] рассмотрен метод последовательной оценки (ЗОТ) на основе модели много-связной цепи Маркова и реализован алгоритм нелинейной фильтрации псевдослучайного сигнала. Эффективность данного метода зависит от сложности устройства, и при высоких требованиях к системе синхронизации сложность возрастает. К тому же, метод ориентирован на реализацию системы синхронизации на физическом уровне, в то время как непригоден для подуровня МАС.

В работе [24] предлагается внутрипериодное накопление сигналов для повышения вероятности приема ПСП.

Рассмотренные методы, как правило, разрабатывались для реализации на физическом уровне и достаточно сложны или нереализуемы на подуровне доступа к среде передачи МАС, где протоколы множественного доступа оперируют с уже принятыми и декодированными битовыми последовательностями.

Существуют другие модификации метода Уорда, которые можно реализовать на подуровне доступа к среде передачи МАС. В работе [23] предложен мажоритарный метод синхронизации ПСП, использование которого повышает вероятность синхронизации ПСП. Недостатком этого метода является значительное повышение вычислительной сложности с увеличением длины линейного рекуррентного регистра. Данный недостаток был решен в работе [21], в которой рассматривается метод мажоритарного декодирования m -последовательности, требующий меньших аппаратных затрат. В работе [11] на базе данного метода декодирования был предложен метод синхронизации ПСП. Преимуществами метода являются:

- высокая помехоустойчивость;
- низкая аппаратная сложность;
- возможность применения его в системах обработки информации с ПСП-ориентированными протоколами множественного доступа.

Поэтому данный метод может быть легко реализован в подобных системах обработки информации.

Выводы. В работе проведен системный анализ и обоснование необходимости повышения точности синхронизации ПСП в системах обработки информации, использующих на подуровне доступа к среде передачи МАС псевдослучайные последовательности.

В частности, сделано следующее.

1. Рассмотрены существующие методы синхронизации ПСП. Показано, что практически все существующие методы ориентированы главным образом на использование на физическом уровне, в то время как их реализация на подуровне доступа к среде обработки информации практически невозможна, либо требует больших вычислительных мощностей. К тому же, некоторые из рассмотренных методов неэффективны при низком отношении сигнал/шум.

2. Показано, что эффективными методами являются методы, основанные на использовании алгебраических особенностей синхросигналов, в частности метод Уорда (метод ЗОТ). Одной из его разновидностей является метод на основе мажоритарного декодирования ПСП, который позволяет значительно повысить помехоустойчивость системы синхронизации. К тому же, он может быть легко реализован на подуровне доступа к среде передачи.

3. Эффективность метода на основе мажоритарного декодирования зависит от длины сегмента ПСП, который принимается приемником. В известных методах мажоритарного приема не исследованы характеристики синхронизации на коротких сегментах ПСП. Хотя именно анализ и исследование вероятностно-временных характеристик (ВВХ) позволит улучшить метод для повышения его эффективности при возрастании вероятностей деструктивных ошибок. Поэтому дальнейшие исследования в этом направлении будут посвящены рассмотрению ВВХ метода.

Библиографический список

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – Москва : Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Золотуев А. Д. Исследование временных характеристик подоптимального метода синхронизации для ПСП-ориентированных протоколов множественного доступа / А. Д. Золотуев, Ф. Г. Хисамов, Ю. В. Чернуха, А. В. Крупенин, А. С. Зеленков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 87–92.
3. Золотуев А. Д. Широкополосный доступ через высотные ретрансляторы для малонаселенных и труднодоступных территорий Сибири, Урала и Дальнего Востока / А. Д. Золотуев // Инфосфера. – 2012. – № 56. – С. 19–20.
4. Крук Б. И. Телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие для студентов вузов связи и колледжей : в 3 т. / Б. И. Крук, В. Н. Попантопуло, В. П. Шувалов ; под ред. В. П. Шувалов. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2013. – 620 с.
5. Новиков И. А. К вопросу о мажоритарном декодировании M -последовательностей / И. А. Новиков,

- В. Н. Номоконов, А. А. Шебанов и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. – 1976. – Вып. 5. – С. 50–55.
6. Патент РФ № 2604345. Устройство синхронизации псевдослучайной последовательности для систем связи с многочастотными сигналами / Ф. Г. Хисамов, Д. Ф. Хисамов, Д. М. Собачкин, А. Д. Золотуев, М. В. Милованов // Бюл. – 2016. – № 34.
7. Прозоров Д. Е. Разработка алгоритмов и устройств поиска нескольких шумоподобных сигналов в системах передачи информации : дис. ... канд. техн. наук / Д. Е. Прозоров. – Киров : Вятский государственный университет, 2001. – 168 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Изд. 2-е, испр. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
9. Уорд Р. Различение псевдослучайных сигналов методом последовательной оценки / Р. Уорд // Зарубежная радиоэлектроника. – 1966. – № 8. – С. 20–37.
10. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения : в 2 т. / В. Феллер. – Москва : Мир, 1984.
11. Хисамов Д. Ф. Моделирование процесса синхронизации датчиков псевдослучайных последовательностей в подавляемых системах радиосвязи : дис. ... канд. техн. наук / Д. Ф. Хисамов. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2005. – 154 с.
12. Шахтарин Б. И. Анализ среднего времени поиска шумоподобных сигналов для систем с одним поглощающим состоянием / Б. И. Шахтарин, А. В. Черныш // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2009. – № 3. – С. 114–123.
13. Aragon-Zavala A. High-Altitude Platforms for Wireless Communications / A. Aragon-Zavala, J. L. Cuevas-Ruiz, J. A. Delgado-Penin. – England : John Wiley and Sons Ltd, Wiley-Blackwell, 2008.
14. Chugg K. M. A new approach to rapid PN code acquisition using iterative message passing techniques / K. M. Chugg, M. Zhu // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2005. – Vol. 23, issue 5. – P. 884–897.
15. Chung S. A new serial search acquisition approach with automatic decision threshold control / S. Chung // IEEE 45th Vehicular Technology Conference. – 1995. – July. – P. 530–536.
16. Ipatov V. Spread Spectrum and CDMA Principles and Applications / V. Ipatov. – University of Turku and Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», John Wiley & Son, 2005. – 400 p.
17. Wang J. A Rapid Code Acquisition Scheme for DS/SS Systems / J. Wang, X. Hu, Y. Zhang, and Q. Dai // Wireless Personal Communications. – June, 2006. – Vol. 39, № 4. – P. 503–514.
18. Fazel K. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed. – Wiley, 2008. – 360 p.
19. Katz M. Code acquisition in advanced CDMA networks : PHD dissertation / M. Katz. – Finland, Oulu : University of Oulu, 2002. – P. 85.
20. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding / C. Kilgus // IEEE Trans. on Communication. COM-21. – 1973. – № 6. – P. 772–774.
21. Markhasin A. Ubiquitous and Multifunctional Mobile Satellite all-IP over DVB-S Networking Technology 4G with Radically Distributed Architecture for RRD Regions / A. Markhasin // International Workshop on Satellite and Space Communications – IWSSC'07, Salzburg, Austria, 13–15 September, 2007. – P. 99–103.
22. Markhasin A. Satellite-Based Fully Distributed Mesh Hybrid Networking Technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD Areas / A. Markhasin // ASMS/SPSC 2010: 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal processing for space Communications Workshop. Cagliari, Italy, September 13–15, 2010. – P. 294–300.
23. Tan X-H. Performance of acquisition in a digital matched-filter for DSSS / X-H. Tan // 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. – 2005. – P. 927–931.
24. Yang L-L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation / L-L. Yang, L. Hanzo // Wireless Communications and Networking. – 2003. – Vol. 1. – P. 683–687.
25. Wu H. SYN-MAC: A distributed medium access control protocol for synchronized wireless networks / H. Wu, A. Utgikar, N-F. Tzeng // Mobile networks and applications. – 2005. – Vol. 10. – P. 627–637.

References

1. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985. – 384 p.
2. Zolotuev A. D., Khisamov F. G., Chernukha Yu. V., Krupenin A. V., Zelenkov A. S. Issledovanie vremennykh kharakteristik podoptimalnogo metoda sinkhronizatsii dlya PSP-orientirovannykh protokolov mnozhestvennogo dostupa [Investigation of the temporal characteristics of a suboptimal synchronization method for PSP-oriented multiple access protocols]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Advances in Modern Radio Electronics], 2016, no. 11, pp. 87–92.
3. Zolotuev A. D. Shirokopolosnyy dostup cherez vysotnye retranslyatory dlya malonaselennykh i trudnodostupnykh territoriy Sibiri, Urala i Dalnego Vostoka [Broadband access through high-altitude repeaters for sparsely populated and inaccessible territories of Siberia, the Urals and the Far East]. *Infosfera* [Infosphere], 2012, no. 56, pp. 19–20.
4. Kruk B. I. Popantonopulo V. N., Shuvalov V. P., Telekommunikatsionnye sistemy i seti : uchebnoe posobie dlya studentov vuzov svyazi i kolledzhey [Telecommunication systems and networks: a manual for students of communication universities and colleges], in 3 vol. 4th ed., rev. and add. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2013. 620 p.
5. Novikov I. A., Nomokonov V. N., Shebanov A. A. et al. K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii

M-posledovatel'nostey [On the question of majority decoding of M-sequences]. *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radioelectronics]. Ser. OT, 1976, issue 5, pp. 50–55.

6. Khisamov F. G., Khisamov D. F., Sobachkin D. M., Zolotuev A. D., Milovanov M. V. Patent RF № 2604345. Ustroystvo sinkhronizatsii psevdosluchaynoy posledovatel'nosti dlya sistem svyazi s mnogochastotnymi signalami [Pseudorandom sequence synchronization device for communication systems with multi-frequency signals]. *Byulleten* [Bulletin], 2016, no. 34.

7. Prozorov D. E. *Razrabotka algoritmov i ustroystv poiska neskol'kikh shumopodobnykh signalov v sistemakh peredachi informatsii* [Development of algorithms and search devices for several noise-like signals in information transmission systems]. Kirov, Vyatka State University, 2001. 168 p.

8. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. 2nd ed., rev. Moscow, Publishing House "Vilyams", 2003. 1104 p.

9. Uord R. Razlicheniye psevdosluchaynykh signalov metodom posledovatel'noy otsenki [Distinguishing pseudorandom signals by the sequential estimation method]. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign Radio Electronics], 1966, no. 8, pp. 20–37.

10. Feller V. *Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya* [Introduction to probability theory and its applications], in 2 vol. Moscow, Mir Publ., 1984.

11. Khisamov D. F. *Modelirovaniye protsessov sinkhronizatsii datchikov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey v podavlyaemykh sistemakh radiosvyazi* [Modeling the process of synchronizing pseudorandom sequence sensors in suppressed radio communication systems]. Voronezh, 2005. 154 p.

12. Shakhtarin B. I., Chernysh A. V. Analiz srednego vremeni poiska shumopodobnykh signalov dlya sistem s odnim pogloschayushchim sostoyaniem [Analysis of the average time to search for noise-like signals for systems with one absorbing state]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana Seriya «Priborostroeniye»* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrumentation"], 2009, no. 3, pp. 114–123.

13. Aragon-Zavala A., Cuevas-Ruiz J. L., Delgado-Penín J. A. *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. England, Ed. John Wiley and Sons Ltd, Wiley-Blackwell, 2008.

14. Chugg K.M., Zhu M. A new approach to rapid PN code acquisition using iterative message passing techniques. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, vol. 23, issue 5, pp. 884–897.

15. Chung S. A new serial search acquisition approach with automatic decision threshold control. *IEEE 45th Vehicular Technology Conference*, 1995, July, pp. 530–536.

16. Ipatov V. *Spread Spectrum and CDMA Principles and Applications*. University of Turku and Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», John Wiley & Son, 2005. 400 p.

17. Wang J., Hu X., Zhang Y. and Dai Q. A Rapid Code Acquisition Scheme for DS/SS Systems. *Wireless Personal Communications*, Jun. 2006, vol. 39, no. 4, pp. 503–514.

18. Fazel K., Kaiser S. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. 2nd ed. Wiley, 2008. 360 p.

19. Katz M. *Code acquisition in advanced CDMA networks, PHD dissertation*. Finland, Oulu, University of Oulu, 2002. p. 85.

20. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding. *IEEE Trans. on Communication*. COM-21, 1973, no. 6, pp. 772–774.

21. Markhasin A. Ubiquitous and Multifunctional Mobile Satellite all-IP over DVB-S Networking Technology 4G with Radically Distributed Architecture for RRD Regions. *International Workshop on Satellite and Space Communications – IWSSC'07*, Salzburg, Austria, 13–15 September, 2007. pp. 99–103.

22. Markhasin A. Satellite-Based Fully Distributed Mesh Hybrid Networking Technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD Areas. *ASMS/SPSC 2010: 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal processing for space Communications Workshop*, Cagliari, Italy, September 13–15, 2010, pp. 294–300.

23. Tan X-H. Performance of acquisition in a digital matched-filter for DSSS. *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005, pp. 927–931.

24. Yang L-L., Hanzo L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation. *Wireless Communications and Networking*, 2003, vol. 1, pp. 683–687.

25. Wu H., Utgikar A., Tzeng N-F. SYN-MAC: A distributed medium access control protocol for synchronized wireless networks. *Mobile networks and applications*, 2005, vol. 10, pp. 627–637.

УДК 621.391 + 004.021

ОСОБЕННОСТИ синхронизации генераторов АПЕРИОДИЧЕСКИХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ И CDMA-СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Статья поступила в редакцию 20.10.2019, в окончательной варианте – 25.11.2019.

Ажмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности,
e-mail: iskander_agm@mail.ru

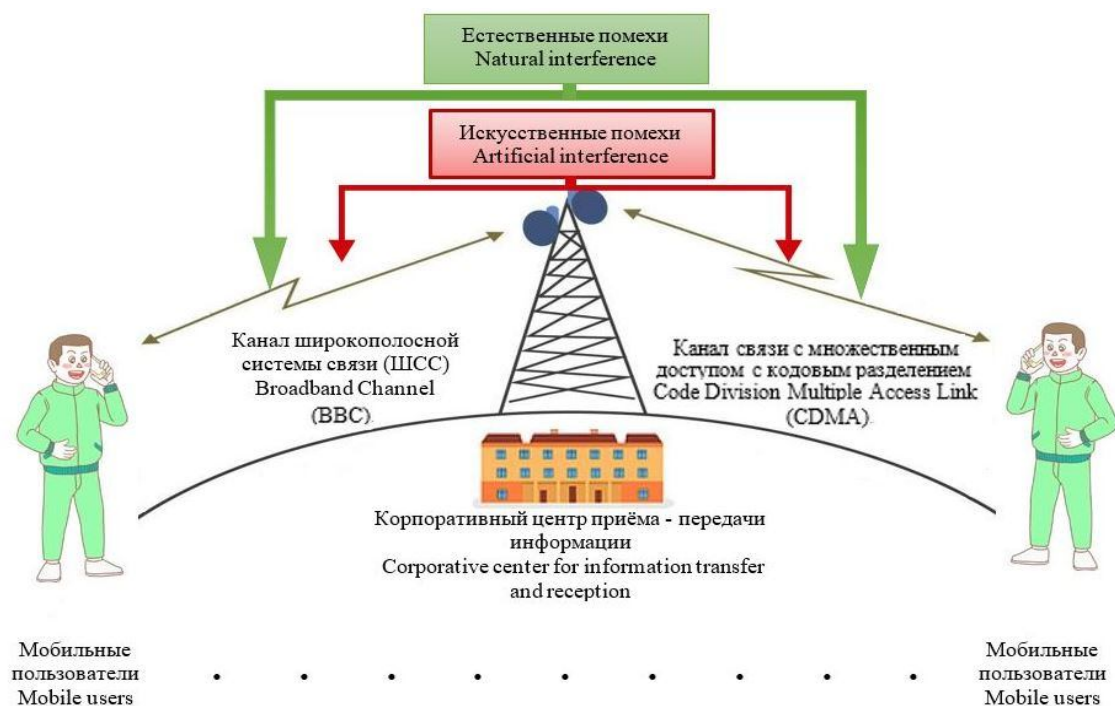
Мельников Евгений Викторович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,
аспирант, e-mail: melnikov@magnit.ru

Подольцев Виктор Владимирович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,
аспирант, e-mail: pvv_001@mail.ru

В статье обоснованы объективные предпосылки активного развития широкополосных систем связи и систем связи, использующих множественный доступ с кодовым разделением (Code Division Multiple Access, CDMA), в Российской Федерации и за рубежом; место этих систем в сфере телекоммуникаций. Указаны основные преимущества таких систем при наличии мощных помех естественной природы или искусственно созданных; перспективы распространения таких систем по всему миру. Указаны методы формирования в широкополосных системах связи и CDMA шумоподобных сигналов на базе использования аperiodических псевдослучайных последовательностей, с помощью которых расширяется полоса частот для передачи информационных посылок сигнала. Подробно проанализированы особенности синхронизации генераторов аperiodических псевдослучайных последовательностей в таких системах в условиях естественных и организованных помех. Показано, что существующие аналитические оценки синхронизации аperiodических псевдослучайных последовательностей в первую очередь были разработаны для каналов достаточно хорошего и удовлетворительного качества и поэтому не могут быть в полной мере использованы в широкополосных системах связи и CDMA, которые предназначены для работы на каналах низкого качества. Указаны основные параметры для оценки эффективности синхронизации датчиков аperiodических псевдослучайных последовательностей в широкополосных системах связи и CDMA.

Ключевые слова: аperiodическая псевдослучайная последовательность, широкополосная связь, шумоподобный сигнал, синхронизация, организованные помехи, мультимедийный доступ с кодовым разделением каналов, система связи CDMA

Графическая аннотация (Graphical annotation)



FEATURES OF SYNCHRONIZATION OF GENERATORS OF ACERIODIC PSEUDORANDOM SEQUENCES IN WIDEBAND AND CDMA COMMUNICATION SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 20.10.2019, in the final version – 24.11.2019.

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Information Security, e-mail: iskander_agm@mail.ru

Melnikov Evgeny V., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, e-mail: melnikov@magnit.ru

Podoltsev Viktor V., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, e-mail: pvv_001@mail.ru

The article substantiates the objective prerequisites for the active development of broadband communication systems and communication systems using Code Division Multiple Access (CDMA) in the Russian Federation and abroad, the place of these systems in the telecommunications sector. The main advantages of such systems in the presence of powerful interference from a natural and organized structure and the prospects for their distribution around the world are indicated. Methods of generating noise-like signals in the broadband communication systems and CDMA are indicated based on the use of aperiodic pseudorandom sequences, with the help of which the frequency band is expanded for transmitting signal information packets. The features of synchronization of aperiodic pseudorandom sequence generators in such systems under natural and organized interference are analyzed in detail. It is shown that the existing analytical estimates of aperiodic pseudorandom sequence synchronization were primarily developed for channels of good enough and satisfactory quality and therefore can not be fully used in broadband communication systems and CDMA systems, which are designed to work on low quality channels. The main parameters for evaluating the efficiency of synchronization of aperiodic pseudorandom sequence sensors in communication systems of broadband communication systems and CDMA are indicated.

Key words: aperiodic pseudorandom sequence, broadband communication, noise-like signal, synchronization, organized interference, code division multiple access, CDMA communication system

Введение. В условиях усиливающейся информатизации, активного внедрения новых технологий и перехода к «цифровой экономике» резко обостряются проблемы защиты информации от злоумышленных кибератак при хранении и передаче, в том числе путем постановки организованных помех со стороны конкурирующих фирм и компаний, а также защиты объектов, представляющих интерес для злоумышленников, от несанкционированного проникновения в систему обработки информации и управления для съема конфиденциальной информации (это может осуществляться квалифицированными ИТ-специалистами – хакерами). Кроме того, большой вред системам обработки информации и управления создают так называемые «крэкеры» – компьютерные взломщики программного обеспечения.

Инциденты типа кибератак представляют большую опасность и часто приводят не только к репутационным, но и прямым финансовым потерям организаций. Скомпрометированные учетные записи могут, например, использоваться злоумышленниками для рассылки спама и/или вредоносного контента. Взлом электронного почтового ящика часто дает возможность злоумышленникам получить доступ к строго конфиденциальной информации, в том числе такой, которая может быть использована для доступа к банковским или иным счетам (в частности, такая информация часто содержится в письмах, которые пользователь получает при регистрации в тех или иных платежных системах, онлайн-сервисах, интернет-магазинах и т.п.).

Одной из возможных целей злоумышленных атак на сайты может быть полное прекращение нормальной работы веб-ресурса, провоцирование ситуации «отказ в обслуживании» с целью истребования денег за прекращение атаки или перехват конфиденциальной информации конкурента для причинения ему финансового ущерба.

Особую опасность для компаний представляют так называемые целевые атаки. В отличие от массовых атак они направлены на сети конкретных компаний, в том числе на их каналы связи. Для этого могут быть созданы мощные целенаправленные организованные помехи, нарушающие функционирование автоматизированных систем управления организацией, в том числе систем с дистанционным доступом к базам данных по каналам связи.

Целевые атаки чаще всего направлены на компании, хранящие или обрабатывающие информацию, используя которую преступники могут получить незаконную прибыль. Это могут быть, в частности, следующие типы компаний:

- банки (цель злоумышленников – получить доступ к данным и осуществить незаконный перевод средств с банковских счетов пользователей);
- биллинговые системы компаний-операторов связи, через которые можно получить доступ к учетным записям пользователей или украсть ценную информацию.

С каждым годом число кибератак растет, с их помощью конкуренты и киберпреступники могут быстро обеспечить себе незаконный доход. При этом набор приемов, используемых злоумышленниками, пополняется едва ли не каждый месяц. В частности, угрозы существуют для радиоканалов, по которым осуществляется передача коммерческой информации между корпоративными сетями подразделений и объектов компании, находящихся на большом удалении от них. При таких условиях важно переходить к широкополосным системам связи и протоколам множественного доступа с кодовым разделением (Code Division Multiple Access, CDMA), которые толерантны к организованным помехам злоумышленников и тем самым обеспечивают эффективную защиту от различных видов кибератак.

В настоящее время радиосвязь играет важнейшую роль в тех местностях, где создание кабельных каналов связи технически трудно реализуемо или является экономически не выгодным. Также радиосвязь важна для обеспечения работы организаций с мобильными пользователями.

Особенно широко применяется радиосвязь для управления бизнесом и филиалами компании, территориально разнесенными на большие расстояния, в том числе находящимися и за пределами государства. Обычно радиосвязь, в силу присущих ей свойств, легко доступна для радиовоздействий конкурентов или злоумышленников, которые могут специально «ставить» организованные помехи большой интенсивности. Кроме того, информацию, передаваемую по радиоканалам, значительно легче перехватить, чем в случае использования кабельных каналов связи.

При переходе к широкополосным системам связи и протоколам CDMA повышается надежность управления территориально разнесенными объектами компании и обеспечивается непрерывность и устойчивость управления, эффективная защита от организованных помех.

В таких системах связи в большинстве случаев устойчивость по отношению к случайным и преднамеренно сгенерированным помехам обеспечивается путем использования сигналов, имеющих сложную внутреннюю структуру, кодирование которой реализуется с помощью апериодических псевдослучайных последовательностей (АПСП). Для декодирования и выделения полезного сигнала на принимающей стороне должна быть сгенерирована такая же АПСП, которая была использована при отправке.

Только при выполнении этого условия можно обеспечить надежное функционирование широкополосных и CDMA-систем связи. Это выдвигает задачу обработки синхронизирующей информации (СИ) при фазировании датчиков АПСП таких систем связи в важную и самостоятельную область исследования. Без научной проработки вопросов обработки синхронизирующей информации в каналах низкого качества практически сложно обеспечить эффективное функционирование коммерческих широкополосных и CDMA-систем связи, инвариантных к организованным помехам в условиях целенаправленных злоумышленных атак конкурирующей стороны или киберпреступников.

В такой постановке задача обработки синхронизирующей информации при принудительном запуске АПСП решается впервые. Известные методы обработки СИ при запуске датчиков псевдослучайных последовательностей (ПСП) разрабатывались, как правило, для каналов достаточно хорошего качества с биномиальным распределением ошибок для получения простых математических выражений, пригодных для инженерных расчетов.

Однако моделирование процесса синхронизации АПСП в нестационарных дискретных каналах низкого качества, подверженных организованным помехам, сильно усложняется из-за сложности получения математических оценок обработки СИ при неизвестных законах распределения организованных помех. Поэтому задача оценки методов обработки СИ и параметров фазирования АПСП в условиях организованных помех является актуальной, обладает новизной и имеет свою специфику решения, не позволяющую напрямую применить известные методы. Рассмотрим специфику использования шумоподобных сигналов (ШПС).

Шумоподобные сигналы (называемые иногда сложными сигналами) часто используются в широкополосных и CDMA-системах связи. При этом их база изменяется согласно закону изменения АПСП [3–12]. Для декодирования и отфильтровывания таких сигналов необходимо обеспечить синхронизацию датчиков АПСП на передающей и приемной сторонах. То есть перед началом связи в таких системах связи возникает проблема синхронизации АПСП [3, 9, 10], которая должна осуществляться применительно к специфике функционирования указанных систем связи, которая подробно рассмотрена ниже.

Шумоподобные сигналы имеют ряд преимуществ перед обычными сигналами, а именно: обладают высокой помехоустойчивостью, скрытностью, инвариантностью к мощным помехам естественной и организованной структуры, уменьшают мощность передатчиков, увеличивают даль-

ность связи, а также обладают возможностями кодового разделения абонентов или, другими словами, обеспечивают многоадресность системы связи [7, 10]. Имея набор шумоподобных сигналов с хорошими корреляционными свойствами, можно построить эффективную систему связи, в которой осуществляется прием сигналов в целом (один из наиболее помехоустойчивых методов приема) [7, 10–12].

ШПС классифицируются следующим образом:

- частотно-модулированные (ЧМ) сигналы;
- фазоманипулированные (ФМ) сигналы;
- многочастотные (МЧ) сигналы;
- дискретные частотные (ДЧ) сигналы;
- дискретные составные частотные (ДСЧ) сигналы [4, 6].

Наибольшее распространение в ШСС и CDMA получили ФМ сигналы, которые широко применяются в космической связи и сотовых системах по стандарту CDMA [3, 7]. Остановимся на краткой характеристике ШСС и CDMA-систем связи.

Широкополосные системы связи. Широкополосные системы активно используются в космической связи. За последние годы средства космической и спутниковой системы связи начали активно развиваться в связи с тем, что в стране отсутствуют в достаточном количестве наземные сети передачи данных. Это связано с дороговизной прокладки кабельных и волоконно-оптических линий связи [3, 10]. Преимущества спутниковых систем связи заключается в том, что их можно оперативно организовать в любом удаленном районе, без больших затрат по сравнению с наземными кабельными сетями связи. Практически спутниковые широкополосные системы связи становятся единственным доступным средством управления удаленными объектами в бизнесе [3, 10]. В настоящее время космическая широкополосная связь активно развивается и за рубежом, в частности в Европе [3]. Ведущие европейские компании, такие как Hughes, Spaceway Lockheed Martin, Alenia Spazio, активно продвигают широкополосные системы связи для организации управления крупнейшими мировыми компаниями не только в Европе, но и в Азии [3].

Таким образом, широкополосные системы космической связи из-за своих преимуществ активно начали распространяться по всему миру и проникли даже в такие отдаленные государства, как Афганистан [3]. Кроме обычных широкополосных систем связи с появлением мобильной связи бурно начали развиваться системы стандарта CDMA, которые являются инновационными и перспективными в мировой системе телекоммуникаций [9, 18]. Рассмотрим принцип организации связи по стандарту CDMA.

Системы связи стандарта CDMA. Системы CDMA (Code Division Multiple Access) самые новые перспективные системы связи. Они позволяют обеспечить многостанционный доступ с кодовым разделением каналов [1]. В них, как и в широкополосных системах связи, используются шумоподобные сигналы. Известен постулат, что все новое – это хорошо забытое старое. Многостанционный доступ с кодовым разделением каналов, который используется в CDMA-системах, впервые был опубликован под названием «Основы теории линейной селекции» в 1935 г. в СССР. Автором статьи являлся Дмитрий Васильевич Агеев [1].

В послевоенные годы технологию CDMA начали применять в военных системах связи у нас в стране и за рубежом [1, 13, 15–17]. В системах CDMA спектр сигнала расширяется за счет скачков по частоте или манипулировании прямой последовательности по закону апериодической псевдослучайной последовательности. Манипуляция прямым методом (или DS – Direct Sequence) находит более широко применение в системах CDMA [17, 19]. Это позволяет надежно защититься от естественных и организованных помех, то есть работать при соотношении сигнал – помеха меньше единицы и малых мощностях передаваемого сигнала [9], а также обеспечить передачу в одном частотном диапазоне сигналов многих абонентов.

Популярно передачу по стандарту CDMA можно объяснить следующим образом.

Представим курортный город, в кафе которого одновременно разговаривают попарно много людей. Люди говорят на разных языках. При этом они слышат и понимают друг друга, в то время как разговоры других воспринимают как фон, который не мешает их общению. Язык, на котором они говорят, как раз и является кодом, если провести аналогию с CDMA. Если продолжать аналогию по отношению к рассмотренным выше широкополосным системам связи, то эти попарно разговаривающие люди будут сидеть в отдельных комнатах и слышать только свой разговор и соответственно их язык подразумевает только один код. Технология CDMA активно продвигается в сторону инновационного развития систем связи III поколения [7, 9].

Учитывая, что в системах ШСС и CDMA используются широкополосные сигналы, для свертки которых необходимо на приемной стороне иметь синфазную АПСЦ, способы синхронизации датчиков АПСЦ в этих системах будут происходить с учетом специфики их функционирования,

которая имеет некоторые общие черты и существенные различия. При этом критерии оценки эффективности синхронизации АПСР в каналах низкого качества для указанных систем связи будут практически одинаковыми. Например, в ШСС синхронизация будет осуществляться по принципу «точка – точка», а в CDMA – с учетом использования прямого или обратного канала с базовой станцией (БС) [7–9].

Исходя из этого, с целью выработки критериев оценки эффективности синхронизации генераторов АПСР в условиях организованных помех в системах ШСС и CDMA рассмотрим особенности синхронизации АПСР в каналах низкого качества [14].

На основании проведенного анализа и рассмотренных особенностей синхронизации АПСР в ШСС и CDMA разработаем критерии для оценки эффективности фазирования генераторов АПСР в каналах низкого качества.

Анализ особенностей синхронизации датчиков АПСР в каналах низкого качества. Канальные методы обработки СИ при запуске псевдослучайных последовательностей применяются достаточно длительное время для систем связи, предназначенных для работы на каналах достаточно хорошего качества с биномиальным распределением ошибок. Биномиальное распределение ошибок позволяет получить простые математические оценки, пригодные для инженерных расчетов. Однако известные точные и приближенные оценки были получены для сравнительно коротких ПСП. Поэтому использование известных моделей для оценки фазирования АПСР приводило к возникновению трансцендентных уравнений, решение которых становилось невозможным даже при использовании современных ЭВМ, а приближенные оценки давали достаточно большие погрешности и поэтому не могли быть использованы для оценки принудительной синхронизации датчиков АПСР широкополосных систем связи.

Известные математические модели фазирования псевдослучайных последовательностей (ПСП) получены лишь для каналов достаточно хорошего качества с вероятностью ошибки не более чем $P < 10^{-3}$. Для разработки математических моделей синхронизации датчиков АПСР систем ШСС и CDMA рассмотрим специфику их применения в каналах низкого качества [19].

В отличие от известных методов в системах ШСС и CDMA скорость выработки аperiodической ПСП должна быть выше скорости передаваемой информации на величину, кратную базе [7, 9, 10]. В связи с тем, что для синхронизации используются информационные посылки основного сигнала, возникает необходимость одновременного переключения датчиков АПСР после окончания фазирования на канальную скорость работы, которая выше информационной скорости в канале на величину, пропорциональную базе. Технически это решается увеличением тактовой частоты генераторов АПСР, которая должна осуществляться одновременно на передающей и приемной сторонах связи. Эта специфика синхронизации датчиков АПСР будет одинаковой для ШСС и CDMA.

Кроме того, в условиях организованных помех фазирование датчиков АПСР может сопровождаться наличием [14]:

- 1) естественных помех в канале передачи данных (при этом мощность сигнала может быть как больше, так и меньше мощности помехи);
- 2) специально организованных помех (мощность помех обычно в этом случае превышает мощность сигнала в канале связи).

Первая ситуация обычно имеет место при первоначальном запуске процесса синхронизации, когда специально организованные помехи еще отсутствуют.

Вторая ситуация возникает при повторной синхронизации и является более опасной, поскольку при повторной синхронизации злоумышленник уже обладает информацией о параметрах сигнала и местонахождении станций и может более эффективно организовать постановку помех. Иногда такой эффект возникает из-за взаимного «подавления» сигналов от одновременно работающих станций [3].

Исходя из этого, становится очевидным, что в условиях организованных помех ситуация, связанная с неудавшейся синхронизацией гораздо опаснее, чем ситуация полного незапуска процесса [3, 9, 10, 17, 19], так как для определения факта неудавшейся синхронизации необходимо большее количество времени, чем для обнаружения факта незапуска данного процесса. Повторный пуск уже будет осуществляться в условиях мощных помех организованной структуры, что затруднит синхронизацию.

Если такая ситуация имеет место быть в однонаправленной системе, то часть синхропосылки (СП), передача которой осуществлялась в течение времени от начала пуска до включения детектора модема, не будет использована (будет утеряна). При этом оставшейся части синхропосылки может не хватить для обеспечения синхронизации.

Если неудачный запуск произойдет в системе с обратной связью, то после подтверждения с момента пуска на другую сторону по обратному каналу будет передаваться СП. При этом по прямому каналу ожидается подтверждение о фазировании. Однако такое подтверждение не сможет быть сформировано из-за различия в АПСР, подаваемых на модемы приема и передачи. Из-за этого на противоположную станцию по обратному каналу начнут поступать «запросы» на синхронизацию.

Отсутствие сигнала в прямом канале система может интерпретировать как следствие действий злоумышленника и перейти в специальный (предусмотренный для этой ситуации) режим и только тогда обнаружить проблему. Таким образом, и в системах с обратной связью процесс детектирования ложности пуска занимает определенное время, в течение которого противоборствующая сторона может создать организованные помехи повторным запуском процесса синхронизации.

Поэтому систему синхронизации датчиков АПСР в ШСС и CDMA необходимо выбирать исходя из условия минимизации количества неудачных запусков при заданной вероятности верной синхронизации.

Кроме рассмотренных выше особенностей синхронизации генераторов АПСР, необходимо остановиться на ситуации перехода системы с ПС-сигналами в режим замедления. Возникающие при этом проблемы могут потребовать ввода определенных ограничений на тактовую частоту синхронизации [2]. Исследования показали, что при значениях стабильности задающих генераторов $K_c \geq 10^{-6}$ цикловая синхронизация датчиков АПСР не успевает нарушиться при скоростях в канале передачи данных вплоть до 3 МГц. Кроме того, для соблюдения требований к надежности тактовой синхронизации в системах ШСС имеется возможность восстанавливать нарушение цикловой синхронизации путем «осаживания» или «подгона» АПСР без повторного запуска процедуры фазирования. Это в условиях организованных помех позволяет быстро восстановить связь.

Параметры оценки качества систем синхронизации АПСР. В широкополосных системах связи и системах связи по стандарту CDMA используются шумоподобные сигналы, манипулированные по закону АПСР и, как правило, по закону прямой последовательности. Следовательно, с учетом рассмотренной специфики систему синхронизации генераторов АПСР в таких системах связи целесообразно оценивать по надежности удержания синхронизма, интервалу времени, необходимому для вхождения в синхронизм, а также величине, характеризующей помехоустойчивость.

Под надежностью удержания синхронизма предполагается сохранение синфазности АПСР при кратковременных сбоях в результате подавления сигнала или замирания сигнала на входе в приемник. Время удержания $t_{уд}$ полностью определяется стабильностью тактовых генераторов частоты [2]. Как правило, значение этого параметра можно обеспечить еще на этапе проектирования системы синхронизации АПСР путем выбора генераторов тактовой частоты с коэффициентом стабильности $K_c \geq 10^{-6}$.

Время вхождения в синхронизм обуславливается оперативно-тактическими соображениями, например, вхождение в синхронизм до постановки помех злоумышленником или необходимостью установки синхронизации при низком качестве канала связи, когда неискаженные блоки появляются сравнительно редко. Эта величина зависит как от заранее известных факторов (например, длина СП), так и от случайных, например, от наличия организованных помех. Для оценки времени вхождения в синхронизм целесообразно ввести параметр – среднее время синхронизации $\bar{t}_c$.

Еще одним показателем качества синхронизации является помехоустойчивость системы в условиях воздействия злоумышленника. Для ее оценки введем следующие обозначения вероятностей:

- вероятность правильного приема синхропосылки – P_{nn} ;
- вероятность ложного запуска – $P_{л}$;
- вероятность пропуска СП – P_{np} .

Совокупность этих вероятностей составляет полную группу событий. Исходя из этого, можно записать:

$$P_{nn} + P_{np} + P_{л} = 1. \quad (1)$$

Так же, как и $\bar{t}_c$, указанные параметры зависят как от заранее известных величин (длина СП), так и от случайных факторов, например от распределения ошибок в канале связи.

Вследствие этого для различных каналов значения этих параметров будут разными, и их, как и $\bar{t}_c$, необходимо рассчитывать каждый раз отдельно, с учетом свойств конкретного канала связи.

Учитывая, что события с вероятностями P_{np} и $P_{л}$ приводят к неприему СП, введем один обобщенный параметр P_n , характеризующий вероятность неприема СП:

$$P_n = P_{л} + P_{np}. \quad (2)$$

Тогда:

$$P_n + P_{nn} = 1. \quad (3)$$

Выводы. Таким образом, для оценки качества цикловой синхронизации генераторов АПСР в условиях организованных помех в системах ШСС и CDMA достаточно двух параметров: среднего времени синхронизации $\bar{t}_c$ и вероятности правильной синхронизации P_{nn} . Эти параметры будут достаточно полно характеризовать качество цикловой синхронизации АПСР. При этом параметр P_n однозначно определяется из (3). А зная значение P_n , можно найти $P_{л}$ и охарактеризовать помехоустойчивость канала связи по всем трем параметрам.

Библиографический список

1. Быховский М. А. Пионеры информационного века. История развития теории связи / М. А. Быховский. – Москва : Техносфера, 2006. – 376 с.
2. Давыдкин П. Н. Тактовая сетевая синхронизация / П. Н. Давыдкин, А. В. Рыжков, М. Н. Колтунов ; под ред. М. Н. Колтунова. – Москва : Эко-Трендз, 2004. – 208 с.
3. Дорнан Энди. Широкополосная связь из космоса / Дорнан Энди // Журнал сетевых решений/LAN. – 2002. – № 02 – С. 14–25. – Режим доступа: <https://www.osp.ru/lan>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 31.08.2019).
4. Зачиняев Ю. В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю. В. Зачиняев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 42–56.
5. Зинчук В. М. Адаптивная цифровая фильтрация шумоподобных сигналов в радиотехнических системах / В. М. Зинчук, Ю. Г. Сосулин, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин // Цифровая обработка сигналов. – 2000. – № 1. – С. 4–18.
6. Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радиосистемы. Обзор состояния и пути развития / И. Я. Иммореев // USUIRCA 2005. – Режим доступа: <http://uwbgroup.ru/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 31.08.2019).
7. История внедрения стандарта связи CDMA. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5153386/page/2/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2019).
8. Кузьминов С. Система сотовой подвижной связи CDMA / С. Кузьминов. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/mobile/sys-cdma.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2019).
9. Кунегин С. В. Сотовые сети стандарта CDMA / С. В. Кунегин. – Режим доступа: <http://kunegin.com>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 27.08.2019).
10. Малыгин И. Широкополосные системы связи / И. Малыгин. – Москва : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 200 с.
11. Одинский А. Л. Мобильные широкополосные системы передачи цифровой информации – компании MOTOROLA / А. Л. Одинский // Евразия Вести. – VII 2008. – Режим доступа: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2008-07>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 29.08.2019).
12. Ericsson Mobility Report. – June 2016. – Режим доступа: <http://www.ericsson.com/res/docs/2016/ericsson-report-2016.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
13. Fazel K. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed. – Wiley, 2008. – 360 p.
14. Fortinet: прогноз состояния киберугроз в ближайшем будущем. – 20.12.2018. – Режим доступа: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=206001>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 29.08.2019).
15. Ilavarasi T. MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications / T. Ilavarasi, N. Kumarathan, K. Rasadurai // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 73, № 13. – P. 12–19.
16. Jain S. Evolution from SDR to Cognitive Radio / S. Jain, N. Taneja // Indian Journal of Applied Research. – 2014. – № 4, issue 8. – P. 248–253.
17. Regazzoni C. Course acquisition and tracking in DS/SS systems / C. Regazzoni // ISIP40. – Режим доступа: http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
18. Wang H. Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system. Hoboken / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen – Режим доступа: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
19. Yang L-L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS over Nakagami-m fading channels / L-L. Yang, L. Hanzo // IEEE Transactions on wireless communications. – 2002. – Vol. 1, № 4. – P. 692–702.

References

1. Bykhovskiy M. A. *Pionery informatsionnogo veka. Istoriya razvitiya teorii svyazi* [Pioneers of the information age. The history of the development of communication theory]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 376 p.
2. Davydkin P. N., Ryzhkov A. V., Koltunov M. N. *Taktovaya setevaya sinkhronizatsiya* [Clock network synchronization]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2004. 208 p.
3. Dornan Endi. *Shirokopolosnaya svyaz iz kosmosa* [Broadband from space]. *Zhurnal setevykh resheniy/LAN* [Journal of Network Solutions/LAN], 2002, no. 02, pp. 14–25. Available at: <https://www.osp.ru/lan> (accessed 08.31.2019).
4. Zachinyayev Yu. V. *Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineynno-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umensheniya dlitelnosti formiruemykh signalov* [Analysis and classification of shapers of linear-frequency-modulated radio signals from the point of view of reducing the duration of the generated signals]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2012, no. 5, pp. 42–56.
5. Zinchuk V. M., Sosulin Yu. G., Limarev A. Ye., Mukhin N. P. *Adaptivnaya tsifrovaya filtratsiya shumopodobnykh signalov v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Adaptive digital filtering of noise-like signals in radio engineering systems]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2000, no. 1, pp. 4–18.

6. Immoreev I. Ya. Sverkhshirokopolosnye radiosistemy. Obzor sostoyaniya i puti razvitiya [Ultra-wideband radio systems. Overview of the state and development paths]. *USUIRKA 2005* [USUIRKA 2005]. Available at: <http://uwbgroup.ru/> (accessed 08/31/2019).
7. *Istoriya vnedreniya standarta svyazi CDMA* [History of the implementation of the CDMA communication standard]. Available at: <https://studfiles.net/preview/5153386/page:2/> (accessed 08.26.2019).
8. Kuzminov S. *Sistema sotovoy podvizhnoy svyazi CDMA* [Cellular mobile communication system CDMA]. Available at: <https://www.ixbt.com/mobile/sys-cdma.html> (accessed 08/26/2019).
9. Kunegin S. V. *Sotovye seti standarta CDMA* [CDMA standard cellular networks]. Available at: <http://kunegin.com> (accessed 08.28.2019).
10. Malygin I. *Shirokopolosnye sistemy svyazi* [Broadband communication systems]. Moscow, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 200 p.
11. Odinskiy A. L. Mobilnye shirokopolosnye sistemy peredachi tsifrovoy informatsii kompanii MOTOROLA [Mobile broadband digital information transmission systems – MOTOROLA companies]. *Yevraziya Vesti* [Eurasia Vesti], VII 2008. Available at: <http://www.eav.ru/pubs.php?number=2008-07> (accessed 08.29.2019).
12. *Ericsson Mobility Report*, June 2016. Available at: <http://www.ericsson.com/res/docs.2016/ericsson-report-2016.pdf> (accessed 29.08.2019).
13. Fazel K., Kaiser S. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. 2nd ed. Wiley, 2008. 360 p.
14. *Fortinet: prognoz sostoyaniya kiberugroz v blizhayshe budushchem* [Fortinet: a prognosis of the status of cyber threats in the near future]. 20.12.2018. Available at: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=206001> (accessed 29.08.2019).
15. Ilavarasi T., Kumaratharan N., Rasadurai K. MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 73, no. 13, pp. 12–19.
16. Jain S., Taneja N. Evolution from SDR to Cognitive Radio. *Indian Journal of Applied Research*, 2014, no. 4, issue 8, pp. 248–253.
17. Regazzoni C. Course acquisition and tracking in DS/SS systems. *ISIP40*. Available at: http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf (accessed 29.08.2019).
18. Wang H., Yao Y-D., Wang R., Shen L. *Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system*. Hoboken. Available at: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf> (accessed 29.08.2019).
19. Yang L-L., Hanzo L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS over Nakagami-m fading channels. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 692–702.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.042-051

УДК 004:89

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЕЁ ГИБРИДИЗАЦИИ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДУЭЛЕЙ

Статья поступила в редакцию 17.11.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

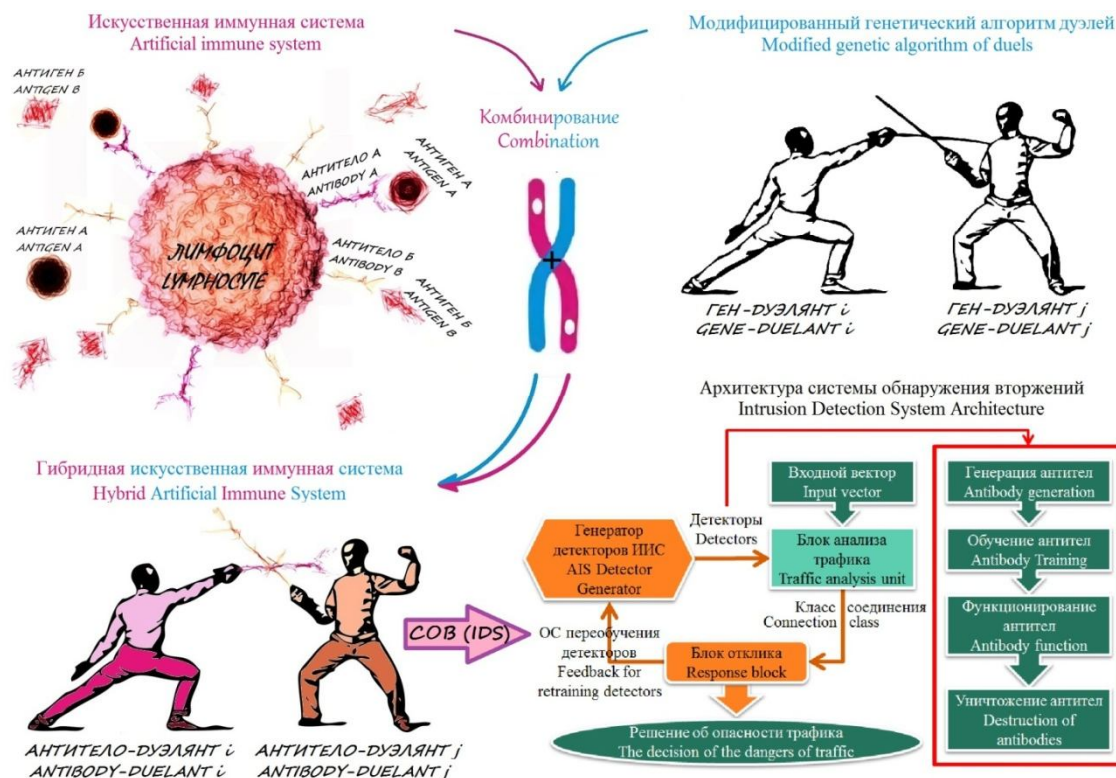
Частикова Вера Аркадьевна, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2
кандидат технических наук, доцент, e-mail: chastikova_va@mail.ru

Митюгов Алексей Игоревич, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2
студент, e-mail: mitugov_alexey@mail.ru

В данной статье представлены результаты разработки гибридной искусственной иммунной системы. Осуществлён анализ существующих алгоритмов искусственных иммунных систем и нового, разработанного на предыдущих этапах исследования и показавшего свою эффективность эвристического алгоритма – модифицированного генетического алгоритма дуэлей. Рассмотрены потенциальные способы комбинации искусственных иммунных систем и модифицированного генетического алгоритма дуэлей для повышения эффективности первых. Проведена оценка эффективности полученных гибридов в разрезе классической задачи оптимизации на примере поиска экстремумов таких целевых функций: функции Михалевича, Растргина, Де Джонга, Янга, кубической, Швепеля и Розенброка. В качестве критериев эффективности были приняты скорость и точность поиска глобального оптимума целевых функций. В результате исследования был найден наиболее эффективный способ гибридизации алгоритмов, заключающийся во включении стадий модифицированного генетического алгоритма дуэлей от этапа предварительной квалификации и до шага ликвидации в классический алгоритм клонального отбора искусственной иммунной системы после созревания аффинности. На базе выбранной эффективной архитектуры гибридной искусственной иммунной системы предложена модель системы обнаружения вторжений.

Ключевые слова: искусственная иммунная система, модифицированный генетический алгоритм дуэлей, глобальная оптимизация, система обнаружения вторжений

Графическая аннотация (Graphical annotation)



DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE ARCHITECTURE OF AN ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM BASED ON ITS HYBRIDIZATION WITH THE MODIFIED GENETIC ALGORITHM OF DUELS

Chastikova Vera A., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chastikova_va@mail.ru

Mityugov Aleksey I., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation

student, e-mail: mitugov_alexey@mail.ru

This article presents the results of the development of a hybrid artificial system, achieved by analyzing existing algorithms of artificial immune systems and a new one, developed at the previous stages of the study and shown to be effective, a heuristic algorithm – a modified genetic method of duels. The authors are considered potential methods of combining artificial immune systems and the modified genetic method of duels to increase the effectiveness of the former, assessed the effectiveness of the obtained hybrids in the context of the classical optimization problem by searching for extrema of such objective functions as: Mikhalevich, Rastrigin, De Jong, Young, cubic, Schwefel and Rosenbrock. The speed and accuracy of the search for the global optimum of objective functions are criteria for the effectiveness of the algorithm. Based on the results of the assessment, the authors determined the most effective way of hybridizing the algorithmic stages of the immune system and the modified genetic method of duels. At the end of the work, the article proposes a model of an intrusion detection system based on the developed hybrid artificial immune system.

Key words: artificial immune system, modified genetic algorithm of duels, global optimization, intrusion detection system

Введение. В настоящее время повсеместно проектируются сложные динамические информационные системы (ИС), развивающиеся и разрастающиеся по объемам быстрыми темпами, что сопровождается рядом проблем. Одной из них является проблема поиска оптимальных значений различных комбинаций параметров таких систем, удовлетворяющих тем или иным наборам условий с наибольшей эффективностью. Однако это связано с преодолением таких трудностей, как многопараметричность, нелинейность и мультимодальность целевых функций [9]. В то же время с развитием информационной среды, повышением ёмкости ИС возрастают риски, связанные с нарушением их функционирования, которое может возникать под воздействием атак злоумыш-

ленников. Это, в свою очередь, делает актуальной проблему обеспечения информационной безопасности систем, поиска методов их защиты, обеспечения гарантии безопасности сетевых соединений. Для решения подобных задач существует целый ряд методов, среди которых выделяются подходы глубокого обучения. Например, это свёрточные нейронные сети, а также менее распространённые, однако показавшие свою эффективность при решении ряда практических задач ИИС, являющиеся объектом исследования в данной работе [7].

В рамках решения задачи информационной безопасности по анализу качества сетевого трафика отмечается, что современные схемы построения сетевых атак характеризуются большой сложностью и запутанностью. В процессе распознавания этих схем требуется выявлять сложные комбинации сетевых транзакций и смежных фактов. В свою очередь, это делает контроль за состоянием сети трудоемким или вовсе невозможным без использования специализированных автоматизированных средств, в частности систем обнаружения вторжений (СОВ) [1]. Одним из способов построения СОВ являются ИИС, особенностью которых является высокая гибкость, возможность настройки под специфику решаемой проблемы, мультизадачность и эффективность [11].

В разрезе решения задач оптимизации классические методы поиска экстремумов нередко оказываются неприменимыми вследствие накладываемых ограничений на оптимизируемые целевые функции или же по причине необходимости существенных временных затрат на поиск. Однако существует ряд подходов, позволяющих достичь высокой эффективности в решении данной проблемы. Среди них наиболее распространёнными и результативными являются различные эвристические алгоритмы, а также непосредственно ИИС [5].

Целью данной работы является разработка эффективной гибридной ИИС на базе классического алгоритма клонального отбора иммунной системы и модифицированного генетического алгоритма дуэлей (МГАД) путём объединения, комбинации их ключевых этапов. После определения наиболее эффективной схемы гибридизации предлагается архитектура системы обнаружения вторжений на базе разработанной гибридной ИИС, которая может быть применена для решения задачи анализа сетевого трафика на наличие сетевых атак.

Материалы и методы исследования. Модифицированный генетический алгоритм дуэлей (МГАД) – это метаэвристический алгоритм роевого интеллекта, разработанный на предыдущих этапах исследований [10] и показавший свою достаточно высокую эффективность. Данный метод представляет собой развитие эвристического алгоритма дуэлей, полученное посредством внедрения в него операторов, применяемых в классическом генетическом алгоритме, а именно: изначально отсутствующего этапа селекции и применение генетических операторов мутации и кроссинговера [13]. Важной особенностью модифицированного алгоритма является то, что в качестве поисковых агентов выступают дуэлянты, соперничающие между собой случайными парами. При этом использование генетических операторов скрещивания и мутации сопровождается ограничением на класс дуэлянтов: класс дуэлянтов-победителей подвергается только оператору мутации, а класс проигравших – кроссинговеру. На рисунке 1 представлен алгоритм работы модифицированного генетического метода дуэлей.

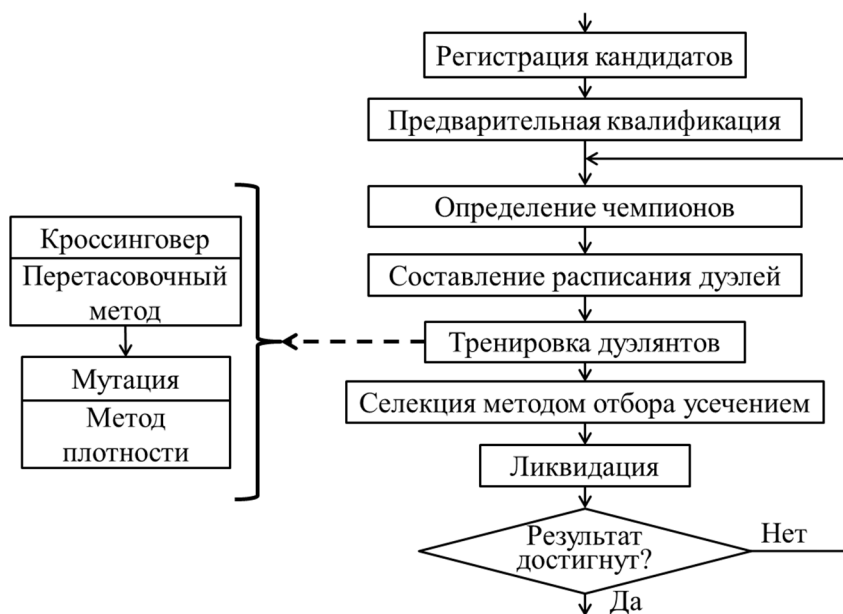


Рисунок 1 – Алгоритм модифицированного генетического метода дуэлей

Также важным признаком данного эвристического метода является то, что в нём применяются такие генетические операторы: метод плотности для мутации (с вероятностью 0,5), перетасовочный метод для кроссинговера и метод отбора усечением (со степенью 0,7) для селекции. Общая вероятность мутации в алгоритме равна 0,1. По результатам предыдущих исследований [10] именно при данных показателях достигается наиболее высокая вычислительная эффективность алгоритма.

Искусственная иммунная система. ИИС представляет собой адаптивную систему, основой которой являются достижения теории иммунологии. В общем случае она характеризуется наличием лимфоцитов, продуцирующих на «своём теле» антитела – детекторы аномальных элементов (антигенов), способные к связыванию с представляющими опасность антигенами [3]. Кроме того, среди ключевых элементов системы выделяют собственные антигены, которые выступают как несвойственные, но полезные для системы объекты. Например, это могут быть подаваемые для обучения на вход системы образы опасного сетевого трафика или, наоборот, полезного трафика.

Существует несколько основных алгоритмов использования ИИС, а именно: метод клональной селекции, метод отрицательного отбора, иммунные сетевые алгоритмы и дендритные алгоритмы [2].

В методе отрицательного отбора во время обучения на вход модели поступают собственные антигены. Затем генерируются случайным образом клетки, которые становятся детекторами (антителами) лишь в том случае, если они не реагируют ни на один из этих антигенов, а также и на уже существующие иммунные клетки (антитела). Таким образом, осуществляется генерация детекторов, соответствующих аномальному, неопisanному поведению исследуемого объекта [4].

Метод клональной селекции как представитель положительного отбора схож со схемой отрицательного метода селекции, но антитела-детекторы генерируются таким образом, чтобы они реагировали на собственные антигены из обучающей выборки. Подобный подход позволяет применять построенную на нём ИИС для решения задачи обнаружения вторжений. Именно поэтому в представленном исследовании для получения модифицированной, более эффективной ИИС был рассмотрен в качестве основы данный алгоритм [12]. На рисунке 2 представлен алгоритм клональной селекции.



Рисунок 2 – Алгоритм клональной селекции

Алгоритм клональной селекции включает в себя следующие этапы:

1. Создание популяции антител в виде случайно сгенерированных детекторов, представляющих собой двоичные массивы признаков.

2. Вычисление аффинности. Аффинность – целевая функция, величина, описывающая степень схожести двух генетических наборов: антигена (элемента обучающей выборки) и антитела из текущей популяции. Значение степеней аффинности определяется между всеми возможными парами «антитело – антиген». Так как генетические наборы признаков представляются в виде бинарных векторов, то степени схожести антигена и антитела вычисляются на основе расстояния Хэмминга. Расстоянием Хэмминга называется число отличающихся битов в двух бинарных векторах. Общий показатель аффинности для антитела складывается из его частных показателей аффинности. Значение частного показателя антитела обратно пропорционально расстоянию Хэмминга между ним и отдельным антигеном из обучающего набора. Соответственно, наибольшим показателем аффинности будет обладать то антитело, которое суммарно относительно каждого собственного антигена имеет наименьшее количество отличных бит.

3. Клональная селекция, сопровождающаяся генерацией для антител их клонов, количество которых пропорционально соответствующим степеням аффинности. Здесь и на следующем этапе пропорция определяется за счёт общей степени аффинности всей популяции, где количество клонов антитела равно произведению некоторого целочисленного коэффициента и отношения аффинности антитела к аффинности всей популяции. Целочисленный коэффициент, применяемый в данной работе, равен исходному размеру популяции.

4. Созревание аффинности, где сначала все имеющиеся клоны с вероятностью, обратно пропорциональной степеням аффинности, подвергаются двухточечной мутации. Двухточечная мутация соответствует замене двух бит бинарного признака из генетического набора антитела на противоположные значения (0 на 1, 1 на 0). Положение бит определяется путём разбиения бинарной строки признака на три равные части, где точки разбиения строки и будут соответствовать подвергающимся мутации битам. Далее для получившихся новых антител вычисляются показатели аффинности, по результатам которых в новую популяцию выбираются лучшие антитела в количестве, равном исходному размеру набора антител-детекторов (размеру популяции).

5. Метадинамика. На данном заключительном этапе осуществляется генерация нескольких новых случайных антител для последующей замены ими худших детекторов получившейся популяции.

Этапы алгоритма выполняются до удовлетворения заданным критериям останова. Критерием останова может служить заданное количество итераций алгоритма или достижение требуемой степени обучения набора антител. В данной работе критерием останова является требование достижения двадцатипроцентного значения аффинности антител к каждому антигену [8].

Разработка гибридной искусственной иммунной системы. Для получения модифицированной модели ИИС был осуществлён поиск наиболее эффективного метода комбинации схемы клональной селекции и МГАД.

В ходе исследования были выявлены следующие три ключевых способа комбинирования алгоритмов:

1. В первом варианте предлагается объединение этапа вычисления аффинности клональной селекции и предварительной квалификации МГАД, что приведёт к получению общего показателя степеней схожести антител-дуэлянтов с антигенами. После этого происходит определение чемпионов (антител-дуэлянтов с лучшими показателями степеней аффинности). Затем осуществляется этап клональной селекции с генерацией клонов антител-дуэлянтов. После этого к полученной популяции из оригиналов и клонов применяется этап составления расписания дуэлей, где и проводятся сражения между парами антител-дуэлянтов в соответствии с их показателями приспособленности. Далее происходит тренировка антител по схеме МГАД и затем ко всем агентам применяется этап созревания аффинности. После чего реализуется объединение этапов метадинамики и ликвидации следующим образом: клоны-ученики, созданные прежними отобранными чемпионами, сравниваются с новыми сгенерированными случайными антителами, в результате сравнения выбираются лучшие агенты для замены худших детекторов. При этом можно заметить, что отсутствует этап селекции, так как в процессе выполнения этапа созревания аффинности уже осуществляется непосредственное усечение всей получившейся популяции ровно до первоначальных размеров.

2. Во втором варианте схема МГАД включается в начало алгоритма клонального отбора. Аналогично первой комбинации этапы метадинамики и ликвидации объединяются, обеспечивая в конце алгоритма обновление худших антител, их замену на новые сгенерированные случайные антитела или клонов-учеников, обученных чемпионами.

3. Третья ключевая комбинация заключается во включении этапов МГАД, начиная от предварительной квалификации и заканчивая ликвидацией антител-дуэлянтов с худшими показателями приспособленности, в схему алгоритма клонального отбора ИИС непосредственно после этапа созревания аффинности. Так как после созревания аффинности популяция обладает исходным размером, то этапы МГАД выполняются классическим методом в прямой последовательности. После этого на стадии метадинамики генерируются новые случайные образы антител для условной замены нескольких худших дуэлянтов.

В результате исследований при сравнении эффективности (результаты сравнения представлены далее в разделе «Сравнительный анализ схем ИИС» данной работы) каждой из представленных выше комбинаций было установлено, что оптимальными свойствами обладает именно третий вариант гибридизации алгоритмов. Ниже, на рисунке 3, представлен итоговый алгоритм гибридной ИИС, соответствующий последнему (третьему) способу гибридизации.

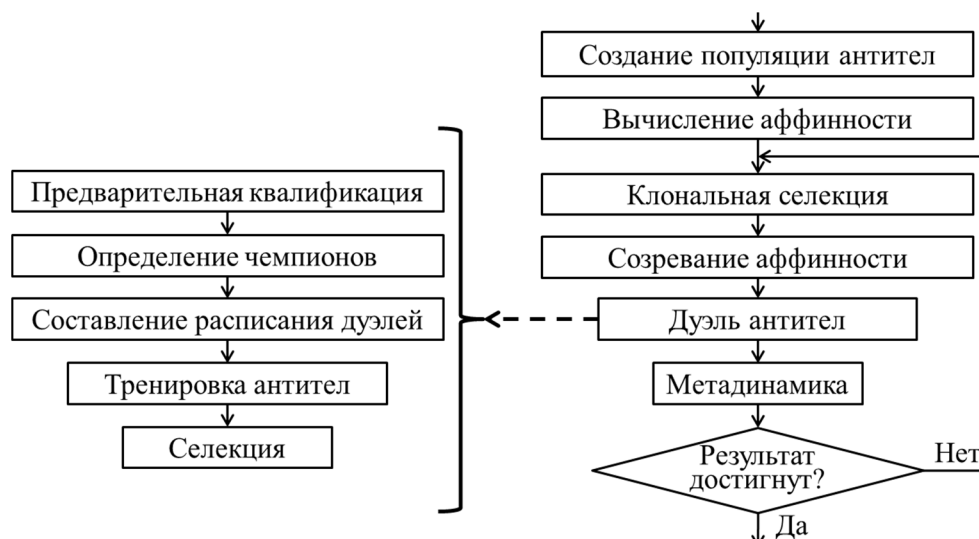


Рисунок 3 – Алгоритм гибридной искусственной иммунной системы

Сравнительный анализ схем ИИС. Для исследования эффективности архитектур гибридных ИИС на языке программирования C# в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio 2017 был разработан программный комплекс, позволяющий осуществлять тестирование ИИС на задаче глобальной оптимизации (в разрезе поиска минимумов целевых функций). Для проведения исследований были выбраны такие целевые функции, как: Михалевича, Растригина, Де Джонга, Янга, кубическая, Швевеля, Розенброка [6].

Для рассмотрения эффективности трёх схем гибридизации осуществлялось их тестирование на поиск минимума перечисленных выше функций для размерностей задач (количества параметров) 5, 10 и 20.

В таблице 1 представлены результаты поиска в виде минимального, требуемого для одного из методов комбинирования, количества итераций (строка) и соответствующие полученные для них средние величины ошибок схем относительно экстремумов. Величина ошибки соответствует отклонению найденного глобального минимума от известного действительного значения минимума целевой функции. Размерность задачи – число переменных в оптимизируемой целевой функции.

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности использования комбинационных схем для гибридной ИИС

Целевая функция	Размерность задачи	Кол-во итераций	Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3
			Величина ошибки		
Де Джонга [-5; 5]	5	70	0,18	0,05	0
	10	145	0,58	0,15	0
	20	320	0,94	0,3	0
Кубическая [-5; 5]	5	70	6,7	2,5	0
	10	165	13,5	5,4	0
	20	500	21	17	0
Розенброка [-5; 5]	5	5750	5,4	1,3	0
	10	13500	12,5	3,2	0
	20	44000	21,5	8,5	0
Швевеля [-500; 500]	5	220	8,5	4,3	0
	10	910	12,9	8,7	0
	20	5400	23,7	14,5	0
Растригина [-5; 5]	5	310	14,2	5,8	0
	10	1350	19,7	12	0
	20	19500	32,4	13,9	0
Янга [-7; 7]	5	100	0,68	0,45	0
	10	370	1,1	0,24	0
	20	650	2,5	1,6	0

На рисунке 4 изображён сравнительный график скорости поиска оптимумов функций для трёх рассматриваемых схем гибридизации. За величину критерия скорости принято количество итераций, осуществлённых алгоритмом, до момента удовлетворения критерию останова.

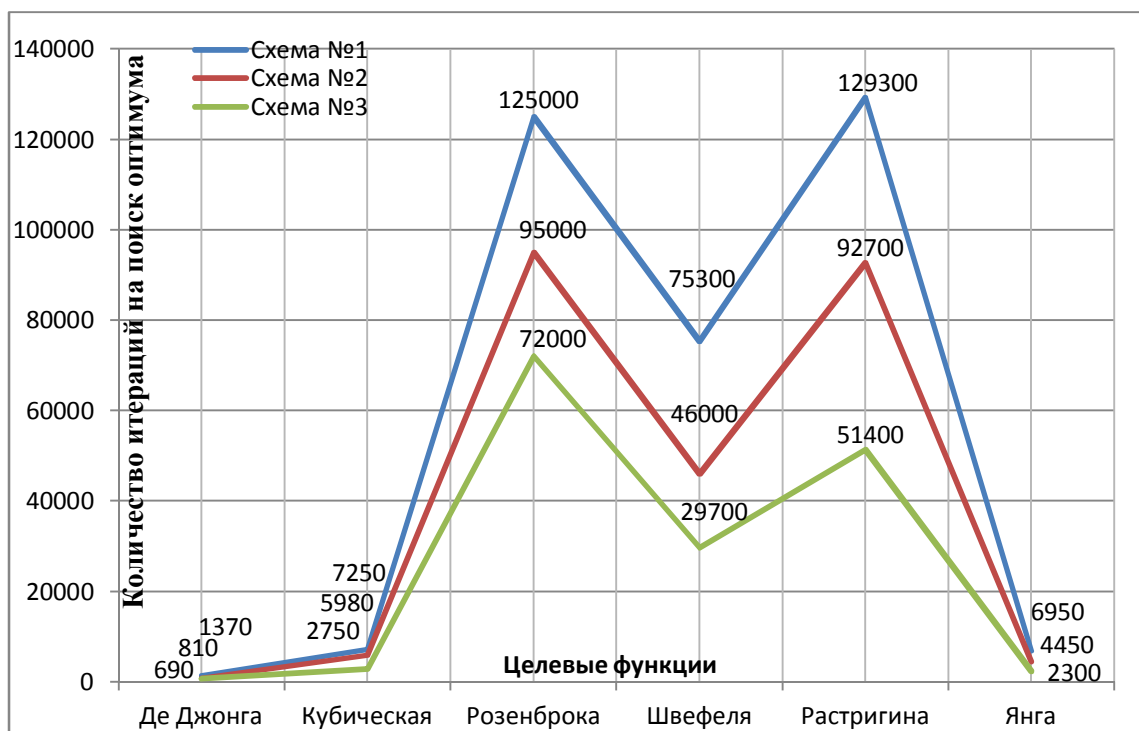


Рисунок 4 – График скорости поиска оптимумов функций для схем гибридизации

По данным таблицы, можно отметить, что лучшие показатели возвращает третья схема, наиболее же отстающей является гибридная схема под номером один. На рисунке 4 представлен график, отражающий среднее количество итераций, затрачиваемое каждой из схем комбинирования клонального алгоритма и МГАД для поиска оптимумов целевых функций при размерности задач, равной 30. Из рисунка видно, что в случае схемы под номером 3 нахождение экстремумов требует меньшее количество итераций работы алгоритма. Таким образом, при решении задачи оптимизации было установлено, что гибридная искусственная иммунная система достигает наибольшей эффективности в случае применения третьей схемы работы алгоритма, базирующейся на включении этапов МГАД, начиная от предварительной квалификации и заканчивая шагом ликвидации, в схему классического алгоритма клонального отбора ИИС непосредственно после этапа созревания аффинности.

В таблице 2 демонстрируются результаты сравнения эффективности работы полученной гибридной иммунной системы и МГАД для задачи глобальной оптимизации функций. Среднее значение соответствует среднему арифметическому вычисленных оптимумов, количество тестов на каждую из целевых функций равняется 40. В скобках указывается величина ошибки – отклонения найденного экстремума от известного глобального экстремума функции.

Таблица 2 – Сравнительный анализ эффективности использования гибридной ИИС и модифицированного генетического алгоритма дуэлей

Целевая функция	Размерность задачи	Кол-во итераций	Гибридная ИИС	Модифицированный генетический алгоритм дуэлей
			Среднее значение (ошибка)	
Де Джонга [-5; 5]	5	60	0 (0)	0,1 (0,1)
	10	130	0 (0)	0,1 (0,1)
	20	300	0 (0)	0,2 (0,2)
Кубическая [-5; 5]	5	70	-625 (0)	-619 (6)
	10	150	-1250 (0)	-1213 (37)
	20	480	-2500 (0)	-2387 (113)
Розенброка [-5; 5]	5	5600	0 (0)	1,4 (1,4)
	10	13000	0 (0)	5,3 (5,3)
	20	42500	0 (0)	32 (32)
Швепеля [-500; 500]	5	200	-2094 (0)	-2089,5 (4,5)
	10	850	-4189,8 (0)	-4123,5 (66,3)
	20	5000	-8379,6 (0)	-8014,2 (365,4)

Растригина [-5; 5]	5	300	0 (0)	13,2 (13,2)
	10	1200	0 (0)	29 (29)
	20	19000	0 (0)	84 (84)
Янга [-7; 7]	5	90	0 (0)	0,1 (0,1)
	10	340	0 (0)	0,36 (0,36)
	20	600	0 (0)	2,1 (2,1)

Далее в рамках решения задачи построения модели системы обнаружения вторжений на базе разработанной эффективной архитектуры гибридной ИИС предлагается показанная на рисунке 5 архитектура СОВ.

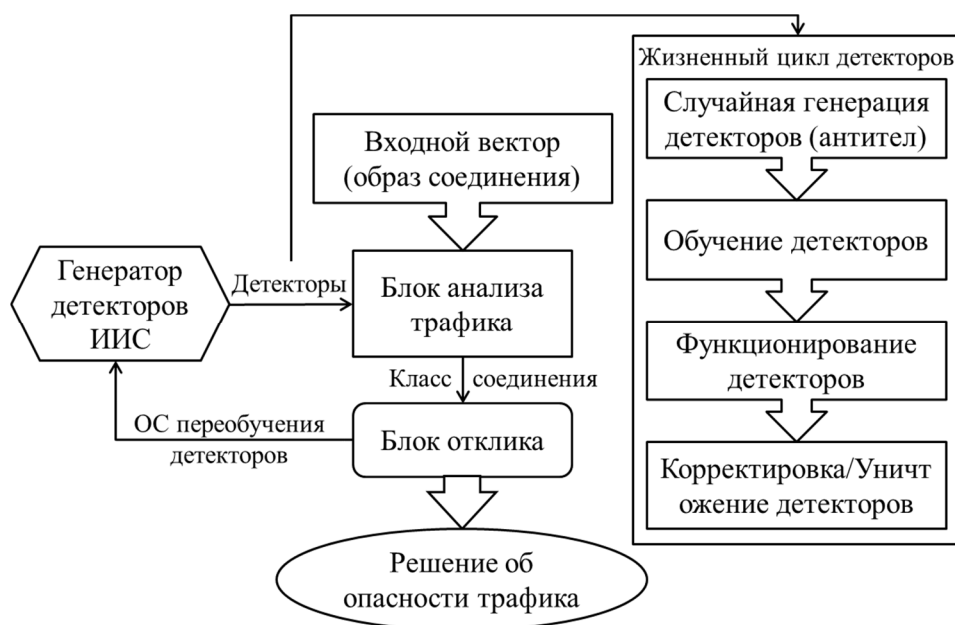


Рисунок 5 – Архитектура системы обнаружения вторжений на основе гибридной искусственной иммунной системы

Первый блок представляет собой генератор детекторов. В нем реализуется первичная работа алгоритма гибридной ИИС для генерации антител и их обучения на подготовленном наборе данных, описывающем опасный сетевой трафик. После чего обученные детекторы применяются в блоке анализа трафика, на который поступает вектор образа сетевого потока. Вектор образа сетевого потока представляет набор ключевых признаков сетевого соединения (например, выделенные характеристики сетевого пакета ТСП/IP в двоичном виде), унифицированных данных. Конкретные анализируемые признаки (параметры) сетевых соединений, формирующие вектор, могут быть различными, определяются специалистами таким образом, чтобы добиться наиболее эффективного анализа трафика системой обнаружения вторжений в рамках ИС. СОВ осуществляет сравнение признаков трафика и набора антител, в результате чего делаются выводы об их схожести, определяется характер поступившего сетевого трафика (безопасен или является вероятной сетевой атакой).

В блоке отклика специалистом-оператором или специальной системой, его заменяющей, обрабатываются результаты анализа трафика, при наличии дополнительных средств защиты информации осуществляется сравнение с событиями ИБ в ИС. Так, в случае определения СОВ трафика как представляющего опасность специалистом проводится расследование данного события, по результатам которого формируется итоговая оценка трафика, утверждение о наличии/отсутствии вторжения. На основе этого предполагается введение обратной связи, которая будет вызывать переобучение, корректировку детекторов на основании верности результатов анализа реального трафика.

Заключение. Таким образом, в рамках исследования была разработана гибридная ИИС путём «скрещивания» схем клонального алгоритма и эвристического МГАД. Установлено, что гибридная модель обладает высокой эффективностью по сравнению с образующими её методами, что подтверждается повышением как точности поиска оптимальных значений целевых функций, так и скоростью их нахождения. Повышение точности и скорости работы алгоритма подтверждается проведёнными в рамках задачи глобальной оптимизации вычислительными экспериментами. Предложенная схема гибридизации обеспечивает наиболее результативное рассивание алгоритма

по пространству поиска посредством последовательного осуществления модификаций признаков агентов-антител, приводящего к большей вариативности популяции, поддержанию тенденции продвижения её к оптимуму, что позволяет решить проблему частого заикливания в локальных экстремумах и обеспечивает быстрый отбор эффективных решений. Предложена архитектура системы обнаружения вторжений, функционирующая на основе разработанной ИИС, для решения задачи обнаружения опасной активности в наблюдаемом сетевом трафике.

Библиографический список

1. Власенко А. В. Разработка алгоритмов и программ выбора оптимального набора компонент нейтрализации актуальных угроз на основе описания модели и интеграции их в WEB-приложение / А. В. Власенко, П. И. Дзюбан // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2014. – № 3 (142). – С. 189–193.
2. Дасгупта Д. Искусственные иммунные системы и их применение / Д. Дасгупта // ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – С. 344–347.
3. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. – 2-е изд. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – С. 195–203.
4. Коромыслов Н. А. О применении искусственных иммунных систем для обнаружения инцидентов информационной безопасности в системах со многими параметрами / Н. А. Коромыслов // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 2, № 17. – С. 299–301.
5. Матвеев М. Г. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике / М. Г. Матвеев, А. С. Свиридов, Н. А. Алейникова. – Москва : Издательский дом «ИНФРА-М», 2014. – С. 316–324.
6. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы : учебно-методическое пособие / Т. В. Панченко ; под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – С. 60–65.
7. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2013. – С. 157–168.
8. Частикова В. А. Определение оптимальных параметров функционирования искусственной иммунной системы для решения задачи обнаружения полиморфных вирусов / В. А. Частикова, М. Ю. Берёзов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 128. – С. 430–440.
9. Частикова В. А. Исследование эффективности алгоритма поиска косяком рыб в задаче глобальной оптимизации / В. А. Частикова, М. А. Дружинина, А. С. Кекало // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4.
10. Частикова В. А. Разработка и исследование модифицированного генетического алгоритма дуэлей / В. А. Частикова, А. И. Митюгов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 8. – С. 144–149.
11. Komar M. Intelligent cyber defense system using artificial neural network and immune system techniques / M. Komar, A. Sachenko, S. Bezobrazov, V. Golovko // Communications in computer and information science. – 2017. – P. 36–38.
12. Mahalakshmi, Murugesan R. Optimization algorithm for minimizing the earliness/tardiness of automated guided vehicles using artificial immune system / Mahalakshmi, Murugesan R. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, no. 22. – P. 11913–11919.
13. Totok Ruki Biyanto. Duelist Algorithm: An Algorithm Inspired by How Duelist Improve Their Capabilities in a Duel / Totok Ruki Biyanto, Henokh Yernias Fibrianto, Gunawan Nugroho, Erny Listijorinib, Titik Budiatic, Hairul Hudad // Advances in Swarm Intelligence : 7th International Conference. – 2016. – P. 39–47.

References

1. Vlasenko A. V., Dzoban P. I. Razrabotka algoritmov i programm vybora optimalnogo nabora komponent neytralizatsii aktualnykh ugroz na osnove opisaniya modeli i integratsii ikh v WEB-prilozhenie [Development of algorithms and programs for selecting the optimal set of components for neutralizing current threats based on the description of the model and integrating them into a WEB application]. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences], 2014, no. 3 (142), pp. 189–193.
2. Dasgupta D. Iskusstvennye immunnnye sistemy i ikh primenenie [Artificial immune systems and their use]. *FIZMATLIT* [PHYSMATLITIS], 2006, pp. 344–347.
3. Karpenko A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennnye prirodoy: uchebnoe posobie* [Modern search engine optimization algorithms. Nature-inspired Algorithms: A Tutorial]. 2nd ed. Moscow, Bauman Moscow State University, 2017, pp. 195–203.
4. Koromyslov N. A. O primenenii iskusstvennykh immunnnykh sistem dlya obnaruzheniya intsidentov informatsionnoy bezopasnosti v sistemakh so mnogimi parametrami [On the use of artificial immune systems to detect information security incidents in systems with many parameters]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2013, vol. 2, no. 17, pp. 299–301.
5. Matveev M. G., Sviridov A. S., Aleynikova N. A. *Modeli i metody iskusstvennogo intellekta. Primenenie v ekonomike* [Models and methods of artificial intelligence. Application in economics]. Moscow, Publishing House "INFRA-M", 2014, pp. 316–324.
6. Panchenko T. V. *Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie* [Genetic algorithms: a teaching tool]. Astrakhan, Publishing House "Astrakhan University", 2007, pp. 60–65.

7. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2013, pp. 157–168.
8. Chastikova V. A., Berezov M. Yu. Opredelenie optimalnykh parametrov funktsionirovaniya iskusstvennoy immunoj sistemy dlya resheniya zadachi obnaruzheniya polimorfnykh virusov [Determining the optimal functioning parameters of an artificial immune system to solve the problems of detecting polymorphic viruses]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2017, no. 128, pp. 430–440.
9. Chastikova V. A., Druzhinina M. A., Kekalo A. S. Issledovanie effektivnosti algoritma poiska kosyakov ryb v zadache globalnoj optimizatsii [A study of the effectiveness of a school of fish search algorithm in the global optimization problem]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 4.
10. Chastikova V. A., Mityugov A. I. Razrabotka i issledovanie modifitsirovannogo geneticheskogo algoritma dueley [Development and research of a modified genetic algorithm of duels]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern Scientific Technologies], Penza, no. 8, 2018, pp. 144–149.
11. Komar M., Sachenko A., Bezobrazov S., Golovko V. Intelligent cyber defense system using artificial neural network and immune system techniques. *Communications in Computer and Information Science*, 2017, pp. 36–38.
12. Mahalakshmi, Murugesan R. Optimization algorithm for minimizing the earliness/tardiness of automated guided vehicles using artificial immune system. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 11913–11919.
13. Totok Ruki Biyanto, Henokh Yernias Fibriantoa, Gunawan Nugroha, Erny Listijorinib, Titik Budiatic, Hairul Hudad Duelist Algorithm: An Algorithm Inspired by How Duelist Improve Their Capabilities in a Duel. *Advances in Swarm Intelligence: 7th International Conference*, 2016, pp. 39–47.

УДК 004.852

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПАЦИЕНТОМ СТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ¹

Статья поступила в редакцию 10.12.2019, в окончательном варианте – 24.12.2019.

Лошманов Вадим Игоревич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, аспирант, e-mail: loshmanov.vadim17@gmail.com

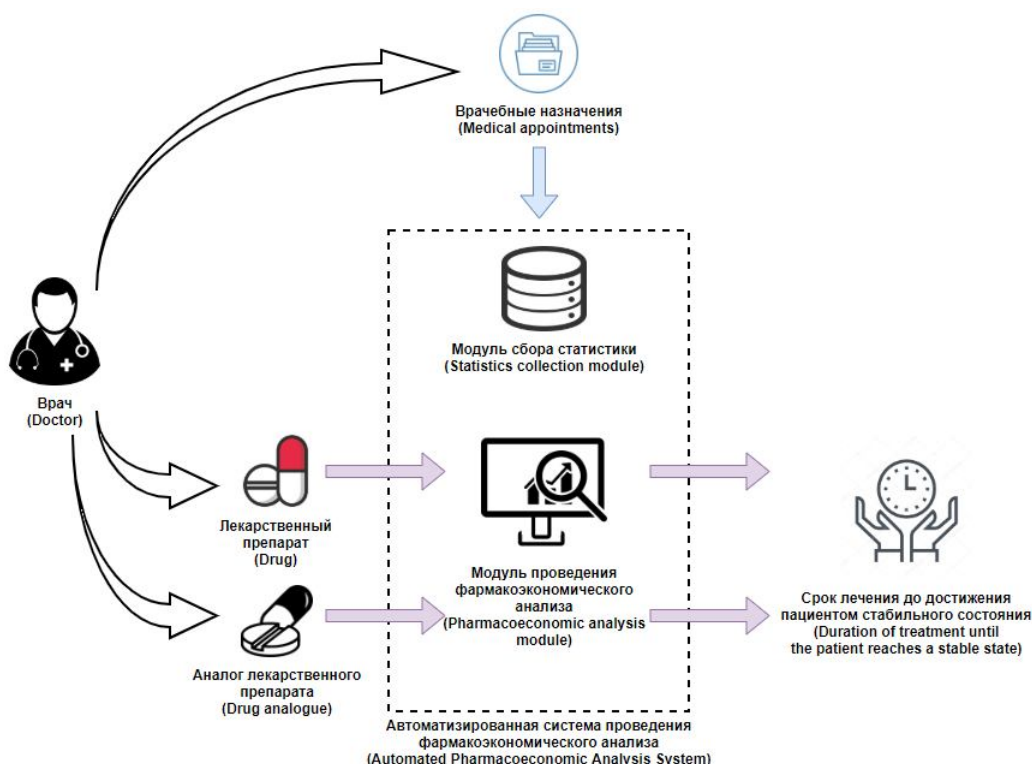
Кравец Алла Григорьевна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, e-mail: agk@gde.ru

В настоящее время существует огромное количество аналогов лекарственных препаратов. В связи с этим необходимо совершенствовать методы проведения фармакоэкономического анализа. В статье приведено обоснование необходимости автоматизации фармакоэкономического анализа и применения разработанной системы поддержки принятия решений при назначении врачом лекарственных средств, в процессе лечения пациентов. Целью настоящей статьи является верификация и оценка точности моделей прогнозирования, построенных с помощью системы поддержки принятия решений в процессе проведения фармакоэкономического анализа назначенных врачом лекарственных препаратов. В статье представлен алгоритм работы системы поддержки принятия решений проведения фармакоэкономического анализа, который основан на скорости достижения пациентом стабильного состояния в процессе лечения патологии. Расчет затрат на применение лекарств для достижения пациентом стабильного состояния позволит без проведения каких-либо исследований, лишь на основе существующей статистики, получить еще один критерий для сравнения препаратов-аналогов. В результате проведенного исследования получено сравнение показателей фармакоэкономического анализа, проведенного традиционным методом и с применением системы поддержки принятия решений проведения фармакоэкономического анализа.

Ключевые слова: фармакоэкономический анализ, прогнозирование, статистика, поддержка принятия решений, статистический анализ данных

¹ Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия инновациям (УМНИК договор № 14254ГУ/2019) и РФФИ (грант № 19-07-01200).

Графическая аннотация (Graphical annotation)



FORECASTING THE TIMING OF DRUG USE TO ACHIEVE A STABLE PATIENT'S CONDITION¹

The article was received by the editorial board on 10.12.2019, in the final version – 24.12.2019.

Loshmanov Vadim I., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: loshmanov.vadim17@gmail.com

Kravets Alla G., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: agk@gde.ru

Currently, there are a huge number of analogues of drugs. In this regard, it is necessary to improve the methods of pharmacoeconomic analysis. The article provides the rationale for the automation of pharmacoeconomic analysis and the application of the developed decision support system for prescribing drugs by a doctor in the treatment of patients. The purpose of this article is to verify and evaluate the accuracy of forecasting models built using the decision support system in the process of conducting pharmacoeconomic analysis prescribed by a doctor. The article presents the algorithm of the decision support system for conducting pharmacoeconomic analysis, which is based on the speed at which the patient reaches a stable state during the treatment of pathology. Calculation of the cost of using drugs to achieve a patient's stable state will allow, without conducting any research, only based on existing statistics, to obtain another criterion for comparing analogous drugs. As a result of the study, we obtained a comparison of pharmacoeconomic analysis indicators, conducted by the traditional method and using the decision support system for conducting pharmacoeconomic analysis.

Key words: pharmacoeconomic analysis, forecasting, statistics, decision support, statistical data analysis

Введение. В процессе прохождения пациентом лечения в медицинских учреждениях накапливается бесчисленное количество информации [4]. В истории болезни пациента фиксируются все изменения его состояния, назначенные лекарственные препараты, пройденные лечебные процедуры [5]. Данную информацию можно использовать при проведении фармакоэкономического анализа (ФА).

Существует четыре метода проведения ФА:

- анализ «Затраты – эффективность»;

¹ The study was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (UMNIK agreement No. 14254GU/2019) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No.19-07-01200).

- анализ «Минимизация затрат»;
- анализ «Затраты – полезность»;
- анализ «Затраты – выгода».

Каждый из этих методов позволяет рассчитать те или иные критерии оценки лекарственных препаратов без учета специфики конкретного случая [3].

Существующую статистику применения лекарств можно использовать для построения прогноза его влияния на пациента в процессе лечения какого-либо заболевания. Выделив основные показатели состояния больного и обучив модель прогнозирования, можно оценить эффективность применения препарата в условиях текущего протекания заболевания.

Цель работы. Целью настоящей работы является поддержка принятия решения врачами при назначении лекарственных препаратов с точки зрения их эффективности и стоимости в сравнении с аналогами на основе методов статистического анализа. Для построения модели прогнозирования изменения состояния пациента в ходе лечения выбран метод случайных лесов. В результате построена модель прогнозирования сроков применения лекарственных препаратов «Кардиомагнил» и «Тромбо АСС» с использованием языка R и среды RStudio. Далее расчеты затрат на достижение пациентом стабильного состояния сравниваются с результатами исследования Д. Ю. Белоусова и соавт., 2015 г. [1], в рамках которого был проведен ФА исследуемых препаратов.

Поддержка принятия решений при проведении ФА лекарственных препаратов. В результате формализованного анализа историй болезни пациента удалось выявить показатели состояния здоровья пациента, которые фиксируются врачами в процессе лечения. При оценке эффективности применения лекарственного препарата основной характеристикой является изменение состояния пациента относительно начального в процессе развития какой-либо патологии. Также немаловажным аспектом является проявление побочных действий используемого лекарства. Если препарат уже прошел клинические испытания, то его побочные действия известны, и их проявление можно отследить, фиксируя изменение показателя состояния пациента, которое будет являться маркером [9, 10].

Разработанная система поддержки принятия решений при проведении ФА представляет модульную структуру (рис. 1). Включает в себя два модуля:

- модуль сбора статистики динамического наблюдения за пациентами (модуль сбора статистики);
- модуль прогнозирования необходимых сроков применения лекарственных препаратов для достижения пациентом стабильного состояния (модуль прогнозирования).

Модуль сбора статистики динамического наблюдения за пациентами предназначен для формирования обучающей выборки, на основе которой будет проводиться обучение модели прогнозирования (рис. 2, 3). Выборка содержит в себе:

- общую информацию о пациенте (пол, возраст, диагноз);
- данные по динамическому наблюдению за пациентом;
- лист врачебных назначений.

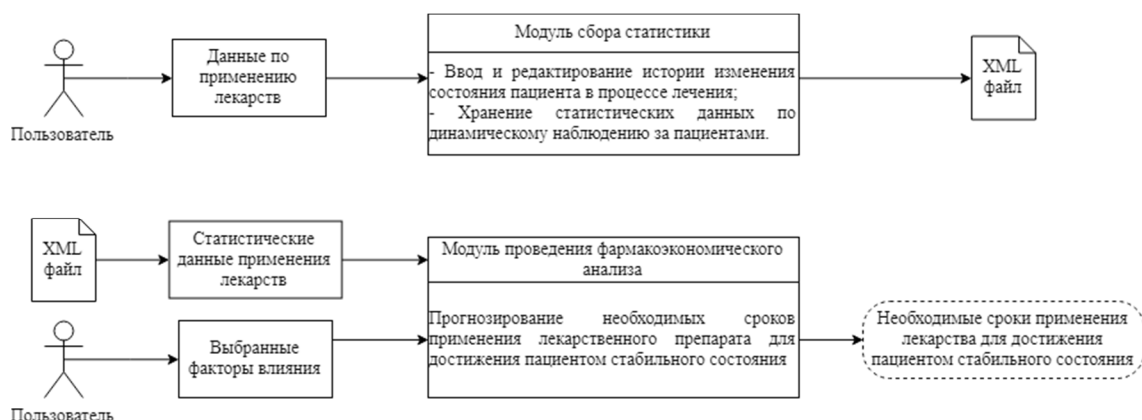


Рисунок 1 – Архитектура комплексной автоматизированной системы проведения ФА

Данные по динамическому наблюдению – это ежедневное фиксирование набора характеристик, описывающих состояние пациента, следить за которыми необходимо в соответствии с установленным диагнозом.

Лист врачебных назначений – список назначенных лекарств в рамках лечения конкретного пациента. Содержит в себе информацию о названии лекарственных препаратов, их дозировке

и о его сроке приема. Исходя из дозировки в последующем, будут рассчитываться затраты на прием исследуемого лекарства.

The 'Form1' window displays a table with the following columns: Пол (Gender), Возраст (Age), Диагноз (Diagnosis), Дата поступления (Admission Date), and Дата выписки (Discharge Date). The table contains 15 rows of patient data. Below the table are buttons: Загрузка (Load), Сформировать выборку (Form selection), Информация (Information), and Добавить пациента (Add patient).

Пол	Возраст	Диагноз	Дата поступления	Дата выписки
Мужской	55	ИБС. Нестабильная стенокардия	12.05.2017	26.05.2017
Женский	85	ИБС. Нестабильная стенокардия	12.05.2017	26.05.2017
Мужской	66	ИБС. Повторный инфаркт миокарда	26.04.2017	10.05.2017
Мужской	75	ИБС. Повторный инфаркт миокарда	24.04.2017	05.05.2017
Женский	65	ИБС. Нестабильная стенокардия	10.05.2017	20.05.2017
Мужской	57	ИБС. Нестабильная стенокардия	02.05.2017	12.05.2017
Мужской	45	ИБС. Инфаркт миокарда	11.05.2017	22.05.2017
Женский	61	ИБС. Нестабильная стенокардия	12.05.2017	26.05.2017
Мужской	69	ИБС. Инфаркт миокарда	10.05.2017	20.05.2017
Женский	61	ИБС. Повторный инфаркт миокарда	20.04.2017	10.05.2017
Женский	61	ИБС. Постинфарктный кардиосклероз	28.04.2017	12.05.2017
Мужской	32	ИБС. Инфаркт миокарда	24.04.2017	10.05.2017
Мужской	64	ИБС. Повторный инфаркт миокарда	29.06.2017	12.07.2017
Мужской	50	ИБС. Нестабильная стенокардия	21.06.2017	04.07.2017
Женский	64	ИБС. Инфаркт миокарда	23.06.2017	04.07.2017

Рисунок 2 – Главное окно модуля сбора статистики

The 'AddPatient' window is divided into several sections. The top left section 'Информация о пациенте' (Patient Information) includes fields for Пол (Gender), Возраст (Age), Дата поступления (Admission Date), Дата выписки (Discharge Date), and Диагноз (Diagnosis). The top right section 'Лист врачебных назначений' (List of medical appointments) is a table with columns: Название (Name), Доза (Dose), and Количество дней приема (Number of days of intake). The bottom section 'Динамическое наблюдение' (Dynamic observation) is a table with columns: Дата осмотра (Date of examination), Состояние пациента (Patient condition), Дыхание (Respiration), Сердце (Heart), Пульс (Pulse), Артериальное давление (Arterial pressure), Печень (Liver), and Отеки (Edema). Buttons 'Добавить' (Add) and 'Сохранить' (Save) are located at the bottom right.

Название	Доза	Количество дней приема
Престариум	2.5 мг / 1 раз в день	14
Аторис	15 мг / 1 раз в день	14
Ацекардол	100 мг / 1 раз в день	14
Кавинтон	100 мг / 1 раз в день	14
Милдронат	500 мг / 1 раз в день	14
Карведилол	6.75 мг / 1 раз в день	14

Дата осмотра	Состояние пациента	Дыхание	Сердце	Пульс	Артериальное давление	Печень	Отеки
16.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	60	126 на 80		Нет
17.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	62	130 на 80		Нет
18.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	60	120 на 90		Нет
19.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	62	130 на 80		Нет
22.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	66	120 на 70		Нет
23.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	70	150 на 90		Нет
24.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	68	140 на 90		Нет
25.05.2017	Средней тя...	Везикулярн	Ритмичные	66	130 на 80		Нет
26.05.2017	Удовлетво...	Везикулярн	Ритмичные	60	130 на 100		Нет

Рисунок 3 – Заполнение информации о пациенте

Модуль прогнозирования (рис. 4) необходимых сроков применения лекарственных препаратов для достижения пациентом стабильного состояния предназначен для обучения модели на основе статистических данных, с помощью которой строится прогноз продолжительности лечения, в результате которого состояние пациента должно стабилизироваться. Обучение модели происходит на основе статистики применения выбранного препарата в процессе лечения выбранного заболевания. Выборка формируется в модуле сбора статистики в файле формата *.csv и далее используется для обучения модели в модуле прогнозирования.

Фармакоэкономический анализ

Меню

Анализ

Выбрать диагноз

ИБС. Ишемический инсульт

Выбрать лекарственный препарат

Аторвастатин

Построить прогноз

Количество дней до выздоровления: [1] 6.875855

Рисунок 4 – Построение прогноза необходимого срока применения препарата

Материалы и методы. Устоявшиеся методы проведения ФА в большинстве своем оценивают соотношение затраты – эффективность применения лекарственных препаратов с точки зрения полного прохождения курса их приема. Зачастую эффект от препаратов достигается намного раньше, чем заканчивается курс лечения. Если найти период приема лекарства до достижения пациентом стабильного состояния, можно точнее рассмотреть показатели затрат со стороны эффективности применения тех или иных препаратов. При имеющейся базе знаний использования препарата в процессе лечения пациентов, которая учитывает изменение их состояния, используя статистические методы построения моделей прогнозирования можно получить достаточно точный показатель времени применения лекарства для возможного перехода пациента из текущего состояния в то, которое, по мнению экспертов, будет являться стабильным [11, 12].

Проведем эксперимент и сравним результаты расчетов затрат на применение двух препаратов ацетилсалициловой кислоты, являющихся аналогами («Кардиомагнил» и «Тромбо АСС»), у больных в возрасте от 60-ти лет, страдающих ишемической болезнью сердца (ИБС). Эксперимент будет проводиться в несколько этапов.

1. Сбор статистических данных по динамическому наблюдению за больными, страдающими ИБС, которым были назначены исследуемые препараты. Записи об изменении состояния пациентов были собраны из историй болезни кардиологических отделений больниц Волгоградской области. В процессе наблюдения за больным фиксировались следующие показатели его состояния (рис. 5):

- описание общего состояния пациента (удовлетворительное, средней тяжести, стабильное и т.д.);
- дыхание (везикулярное, жесткое);
- тоны сердца (ритмичные, аритмичные);
- наличие жалоб;
- наличие хрипов в легких;
- пульс;
- артериальное давление;
- наличие шумов в сердце;
- наличие отеков.

21.04.17г 19.00 Жалобы: остается чувство тяжести, ночь провел спокойно
STATUS PRAESENS: Общее состояние средней тяжести. Кожные покровы чистые, обычной окраски. Периферические лимфоузлы не увеличены. Грудная клетка обычной формы. Перкуторно – легочный звук. Аускультативно – дыхание везикулярное, хрипов не выслушивается. ЧД = 18 в мин. Тоны сердца – приглушены, ритмичные. ЧСС = 69 уд в мин. АД – 120/75 мм.рт. ст. Живот мягкий, безболезненный при глубокой пальпации. Печень – край по правой реберной дуге по среднеключичной линии. По Курлову 10х9х8см. Селезенка – не пальпируется. Поясничная область визуально не изменена. Пальпация почек безболезненная, пальпаторно не определяются. Симптом поколачивания (-), (-) билатерально. Отеков нет.
Терапия плановая.

Рисунок 5 – Запись динамического наблюдения за пациентом

2. Подготовка обучающей выборки на основе полученных данных.
 3. Построение модели прогнозирования с учетом известных факторов влияния на состояние пациента. Методом построения модели был выбран метод случайных лесов [6, 7].
 4. Обучение модели прогнозирования.
 5. Построение прогнозного значения сроков применения пациентом лекарственного препарата для достижения стабильного состояния. Стабильное состояние было представлено в следующем виде: состояние пациента – стабильное, дыхание – везикулярное, тоны сердца – ритмичные, жалобы отсутствуют, хрипов нет, пульс около 70, артериальное давление 120 на 80, шумов нет, отеков нет.
 6. Расчет затрат на применение препаратов «Кардиомагнил» и «Тромбо АСС» до достижения пациентом стабильного состояния.
 7. Сравнение полученных результатов с результатами проведения ФА в исследовании Д.Ю. Белоусова и соавт., 2015 г. [1].
- В результате использования модуля сбора данных по динамическому наблюдению за пациентами формируется обучающая выборка (рис. 6), которая используется далее при построении модели прогнозирования.

Дата поступления	Дата выписки	Возраст	Пол	Диагноз	Динамическое наблюдение										Лечебное назначение			
					Дата осмотра	Состояние пациента	Жалобы	Дыхание	Хрипы	Тоны сердца 1	Тоны сердца 2	Пульс	АД верхнее	АД нижнее	Шумы	Отеки	Название препарата	Доза
12.05.2017	26.05.2017	55	Мужской	ИБС. Нестабильная стенокардия	16.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	60	126	80	Нет	Нет	Престариум	2,5
					17.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	62	130	80	Нет	Нет	Аторис	15
					18.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	60	120	90	Нет	Нет	Ацекардол	100
					19.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	62	130	80	Нет	Нет	Кавинтон	100
					22.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	66	120	70	Нет	Нет	Милдронат	500
					23.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	70	150	90	Нет	Нет	Карведилол	6,75
					24.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	68	140	90	Нет	Нет	Лориста	2,5
					25.05.2017	Средней тяжести	Нет	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	66	130	80	Нет	Нет		
					26.05.2017	Удовлетворительное	Нет	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	60	130	100	Нет	Нет		
					12.05.2017	26.05.2017	85	Женский	ИБС. Нестабильная стенокардия	16.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	78	130
17.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	64	110	75	Нет	Нет	Ацекардол	200
18.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	70	130	75	Нет	Нет	Индапамид	1,5
19.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	70	140	75	Нет	Нет	Просерин	2,5
20.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	78	140	75	Нет	Нет	Мексидол	100
22.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	78	130	80	Нет	Нет	Амлодипин	2,5
23.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	72	130	90	Нет	Нет	Прадакса	110
24.05.2017	Средней тяжести	Нет	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	68	125	70	Нет	Нет	Омепразол	20
25.05.2017	Удовлетворительное	Нет	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	61	120	70	Нет	Нет		
26.05.2017	Удовлетворительное	Нет	Везикулярное	Нет						Приглушены	Ритмичные	64	120	75	Нет	Нет		
26.04.2017	10.05.2017	66	Мужской	ИБС. Повторный инфаркт миокарда	26.04.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	72	130	90	Нет	Нет	Верошпирон	25
					27.04.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	58	145	90	Нет	Нет	Брилинта	90
					28.04.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	68	130	90	Нет	Есть	Ацекардол	50
					02.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	50	145	80	Нет	Есть	Аторвастатин	30
					03.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	58	120	80	Нет	Есть	Амлодипин	5
					04.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	60	125	80	Нет	Нет	Колмадор	75
					05.05.2017	Средней тяжести	Есть	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	62	120	90	Нет	Нет	Бисопролол	5
					06.05.2017	Удовлетворительное	Нет	Везикулярное	Нет	Приглушены	Ритмичные	60	110	80	Нет	Нет		

Рисунок 6 – Пример выборки динамического наблюдения за пациентами с ИБС

Описание общего алгоритма работы автоматизированной системы проведения фармако-экономического анализа. Результат работы системы зависит от грамотного использования обеих ее модулей. Последовательность действий, которые выполняет система, показана на рисунке 7.

После сбора необходимого объема статистики применения исследуемой методики лечения пациентов формируется обучающая выборка в формате *.csv. Она получается в процессе работы пользователя с модулем сбора статистики по динамическому наблюдению за пациентами. Далее обучающая выборка поступает на вход модуля прогнозирования необходимых сроков применения лекарственных препаратов для достижения пациентом стабильного состояния. При этом пользователь заполняет характеристики состояния пациента, которые, по его мнению или по мнению экспертов, описывают стабильное состояние при протекании исследуемого заболевания. По запросу пользователя система проводит построение модели прогнозирования и выводит результат, а именно срок необходимого приема лекарственного препарата, достаточного для получения положительной динамики лечения.

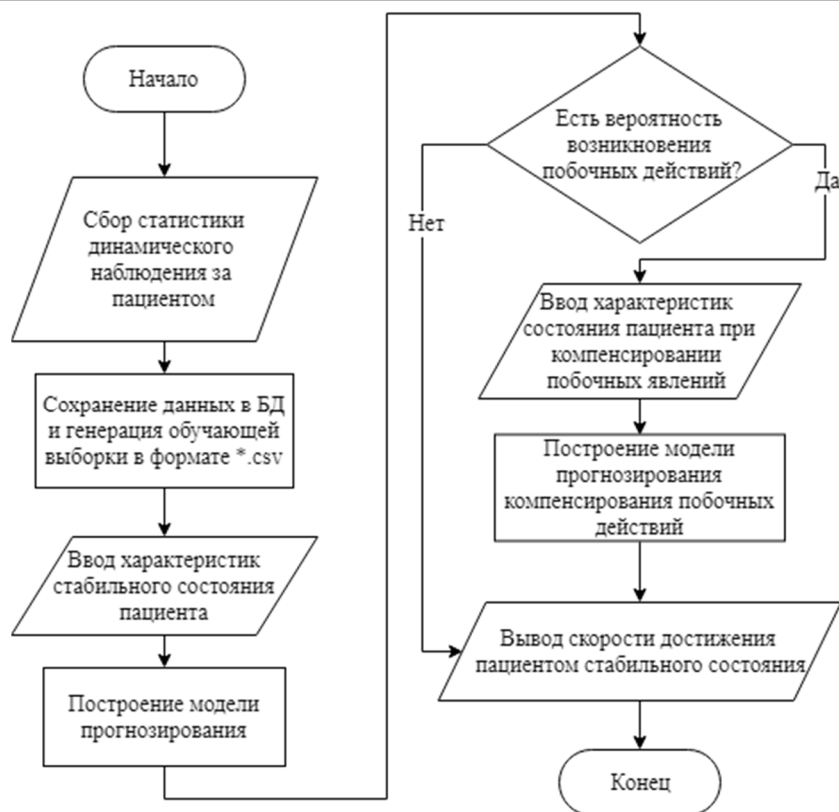


Рисунок 7 – Общий алгоритм работы в программе

Верификация и проверка точности построенных моделей прогнозирования. Для проведения данного эксперимента были взяты две обучающие выборки. Первая состоит из 250 записей динамического наблюдения за пациентами с ИБС, которым был назначен препарат «Кардиомагнил». Вторая – из 250 записей динамического наблюдения за пациентами с ИБС, которым был назначен препарат «Тромбо АСС». По каждой из выборок построены модели прогнозирования срока применения лекарственного средства и рассчитаны затраты на их приобретение. Полученные результаты сравниваются с результатами проведения ФА в исследовании Д.Ю. Белоусова и соавт., 2015 г. [1]. Во избежание возникновения расхождений из-за изменения цены на препараты в эксперименте при расчете затрат будут использованы цены, указанные на момент проведения исследования [1], а именно на 2014 г. (стоимость суточной дозы «Кардиомагнил» составляет 3,46 руб./сут, а «Тромбо АСС» – 2,05 руб./сут. [1]).

Исходя из сравнительного клинического исследования, проведённом Э.П. Яковенко и соавт. [2], в рамках которого была выявлена частота развития желудочных диспепсических расстройств и эрозивно-язвенных поражений слизистой оболочки желудка, необходимо сделать поправку при построении прогноза на возможность развития описанных выше побочных явлений. Таким образом, в конечном состоянии пациента необходимо указать то, что с вероятностью 30 % («Кардиомагнил») и 55 % («Тромбо АСС») возможно появление жалоб по ЖКТ.

Далее строится третья модель прогнозирования для расчета затрат на покрытие побочных явлений по каждому препарату [8]. Для коррекции побочных эффектов у пациентов при применении обоих лекарственных средств будет использоваться «Омепразол» (основанием для выбора данного препарата является то, что во всех записях обучающей выборки, участвующей в эксперименте для покрытия побочных явлений, связанных с ЖКТ, использовался именно он). Для третьей модели будет использоваться обучающая выборка размером 300 записей динамического наблюдения за пациентами. Сравнение результатов расчетом затрат на применение двух лекарственных средств приведено в таблице.

Таблица – Сравнение результатов эксперимента

Исследуемые лекарственные препараты		Расчеты эксперимента	Расчеты в исследовании [1]
«Кардиомагнил»	Затраты на препарат	328 сут. * 3,46 руб./сут. = 1134,88 руб.	1264,51 руб.
	Коррекция побочных явлений	30% * 98,27 руб./сут. * 27 сут. = 795,99 руб.	884,40 руб.
«Тромбо АСС»	Затраты на препарат	371 сут. * 2,05 руб./сут. = 760,55 руб.	747,12 руб.
	Коррекция побочных явлений	55% * 98,27 руб./сут. * 27 сут. = 1459,30 руб.	1621,39 руб.

Результаты и обсуждение. Результаты эксперимента показывают, что при проведении ФА лекарственных препаратов с использованием исследуемого метода полученные показатели затрат незначительно отличаются от устоявшихся методов. В свою очередь исследуемый метод позволяет получить стоимость достижения стабильного состояния пациента, не прибегая к излишней организации клинических испытаний. Данные, используемые для обучения модели прогнозирования были сформированы из историй болезни около 50-ти пациентов, которые проходили лечение в течение 3-х месяцев. В то же время в статье [1] ФА проводился в условиях наблюдения за 132 пациентами в течение одного года. Одинаковые результаты удалось получить, потратив в 4 раза меньше времени, без учета того, что они являются архивными, т.е. нет необходимости проводить какие-либо исследовательские мероприятия.

Выводы. Оценка сроков применения лекарств для достижения пациентом стабильного состояния позволяет получить критерий сравнения препаратов, являющихся аналогами как с точки зрения затрат на их приобретение, так и со стороны эффективности их использования. В то же время этот критерий доступен без проведения каких-либо исследовательских мероприятий, что ведет за собой экономию времени и денежных средств. Но данный метод проведения ФА применим лишь для препаратов, которые уже прошли клинические испытания и широко используются в медицинской практике. И сложность в получении данного критерия заключается только в сборе и обработке статистики изменения состояния пациентов при применении исследуемого лекарства.

Библиографический список

1. Белоусов Д. Ю. Анализ «минимизации затрат» применения препаратов ацетилсалициловой кислоты у кардиологических пациентов пожилого возраста / Д. Ю. Белоусов, Е. В. Афанасьева // Качественная клиническая практика. – 2015. – № 1.
2. Яковенко Э. П. Влияние препаратов ацетилсалициловой кислоты на морфофункциональное состояние слизистой оболочки желудка у кардиологических пациентов пожилого возраста / Э. П. Яковенко, Л. П. Краснотелова, А. В. Яковенко, Н. А. Агафонова, А. Н. Иванов, Е. А. Богомолова, Ю. Ю. Павлова, А. С. Прянишникова // Сердце: журнал для практикующих врачей. – 2013. – Т. 12, № 3 (71). – С. 145–150.
3. Ягудина Р. И. Основы фармакоэкономического анализа / Р. И. Ягудина, Р. С. Скулкова // Вестник НЦЭСМП. – 2011. – № 2.
4. Orudjev N. Y. Computer – Based visual analysis of ecology influence on human mental health / N. Y. Orudjev, M. B. Lempert, I. Osaulenko, N. A. Salnikova, A. A. Kuzmichev, A. G. Kravets // 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA) (Greece, 13–15 July 2016) / Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2016. – DOI: 10.1109/IISA.2016.7785416. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7774711>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
5. Kravets A. G. The Development of Medical Diagnostics Module for Psychotherapeutic Practice / A. G. Kravets, O. Poplavskaya, L. Lempert, N. Salnikova, I. Medintseva // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12–14, 2017) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos ; Volgograd State Technical University [et al.]. – Germany : Springer International Publishing AG, 2017. – P. 872–883. – (Ser. Communications in Computer and Information Science ; vol. 754).
6. Shcherbakov M. V. A Survey of Forecast Error Measures / M. V. Shcherbakov, A. Brebel's, N. L. Shcherbakova, A. P. Tyukov, T. A. Yanovskiy, V. A. Kamaev // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, spec. issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – P. 171–176.
7. Al-Gunaid M. A. Analysis of Drug Sales Data based on Machine Learning Methods / M. A. Al-Gunaid, M. V. Shcherbakov, A. G. Kravets, V. I. Loshmanov, A. M. Shumkin, V. N. Trubitsin, D. V. Vakulenko // 7th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART–2018, IEEE Conference ID: 44078) (23rd–24th November, 2018) : Proceedings / ed. by Rakesh Kumar Dwivedi ; College of Computing Sciences & Information Technology, Teerthanker Mahaveer University (Moradabad, UP, India), IEEE UP Section. – New Delhi, 2018. – P. 32–38.
8. Kravets A. G. Model of medicines sales forecasting taking into account factors of influence / A. G. Kravets, M. A. Al-Gunaid, V. I. Loshmanov, S. S. Rasulov, L. B. Lempert // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. –

Vol. 1015. – 8 p. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032073/pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

9. Sherri R. Machine Learning for Prediction in Electronic Health Data / R. Sherri // *JAMA Network Open*. – 2018. – № 1 (4). – DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2018.1404.

10. Crown W. H. Potential application of machine learning in health outcomes research and some statistical cautions / W. H. Crown // *Value in Health*. – 2015. – Vol. 18. – P. 137–140. – DOI: 10.1016/j.jval.2014.12.005.

11. Chen Y. Precision Health Economics and Outcomes Research to Support Precision Medicine: Big Data Meets Patient Heterogeneity on the Road to Value / Y. Chen, G. F. Guzauskas, G. M. Chengming, B. C. Wang, W. E. Furnback, X. Guotong, P. Dong, L. P. Garrison // *Journal of Personalized Medicine*. – 2016. – Vol. 6, № 20. – DOI: 10.3390/jpm6040020.

12. Doupe P. Machine Learning for Health Services Researchers / P. Doupe, J. Faghmous, S. Basu // *Value in Health: The Journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research*. – 2019. – Vol. 22 (7). – P. 808–815. – DOI: 10.1016/j.jval.2019.02.012.

References

1. Belousov D. Y., Afanaseva E. V. Analiz «minimizatsii zatrat» primeneniya preparatov atsetilsalitsilovoy kisloty u kardiologicheskikh patsientov pozhilogo vozrasta [Analysis of "minimizing costs" of the use of acetylsalicylic acid preparations in elderly cardiologists patients]. *Kachestvennaya klinicheskaya praktika* [Good Clinical Practice], 2015, no. 1.

2. Yakovenko E. P., Krasnolobova L. P., Yakovenko A. V., Agafonova N. A., Ivanov A. N., Bogomolova E. A., Pavlova Y. Y., Pryanishnikova A. S. Vliyaniye preparatov atsetilsalitsilovoy kisloty na morfofunktsionalnoe sostoyaniye slizistoy obolochki zheludka u kardiologicheskikh patsientov pozhilogo vozrasta [The effect of acetylsalicylic acid preparations on the morphofunctional state of the gastric mucosa in elderly cardiologists patients]. *Serdtshe: zhurnal dlya praktikuyushchikh vrachey* [Heart: A Journal for Practitioners], 2013, vol. 12, no. 3 (71), pp. 145–150.

3. Yagudina R. I., Skulkova R. S. Osnovy farmakoekonomicheskogo analiza [Fundamentals of pharmacoeconomic analysis]. *Vedomosti SCEEMP* [Journal SCEEMP], 2011, no. 2.

4. Orudjev N. Y., Lempert M. B., Osaulenko I., Salnikova N. A., Kuzmichev A. A., Kravets A. G. Computer – Based visual analysis of ecology influence on human mental health. *7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA) (Greece, 13–15 July 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2016. DOI: 10.1109/IISA.2016.7785416. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7774711>.

5. Kravets A. G., Poplavskaya O., Lempert L., Salnikova N., Medintseva I. The Development of Medical Diagnostics Module for Psychotherapeutic Practice. Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. *Second Conference, CIT&DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12–14, 2017) : Proceedings ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos: Volgograd State Technical University [et al.]*. Germany, Springer International Publishing AG, 2017, pp. 872–883. (Ser. Communications in Computer and Information Science ; vol. 754).

6. Shcherbakov M. V., Brebel's A., Shcherbakova N. L., Tyukov A. P., Yanovskiy T. A., Kamaev V. A. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal (WASJ)*, 2013, vol. 24, spec. issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society, pp. 171–176.

7. Al-Gunaid M. A., Shcherbakov M. V., Kravets A. G., Loshmanov V. I., Shumkin A. M., Trubitsin V. N., Vakulenko D. V. Analysis of Drug Sales Data based on Machine Learning Methods. *7th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART-2018, IEEE Conference ID: 44078) (23rd–24th November, 2018) : Proceedings ed. by Rakesh Kumar Dwivedi ; College of Computing Sciences & Information Technology, Teerthanker Mahaveer University (Moradabad, UP, India), IEEE UP Section*. New Delhi, 2018, pp. 32–38.

8. Kravets A. G., Al-Gunaid M. A., Loshmanov V. I., Rasulov S. S., Lempert L. B. Model of medicines sales forecasting taking into account factors of influence. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015. 8 p. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032073/pdf>.

9. Sherri R. Machine Learning for Prediction in Electronic Health Data. *JAMA Network Open*, 2018, no. 1 (4). DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2018.1404.

10. Crown W. H. Potential application of machine learning in health outcomes research and some statistical cautions. *Value in Health*, 2015, vol. 18, pp. 137–140. DOI: 10.1016/j.jval.2014.12.005.

11. Chen Y., Guzauskas G. F., Chengming G. M., Wang B. C., Furnback W. E., Guotong X., Dong P., Garrison L. P. Precision Health Economics and Outcomes Research to Support Precision Medicine: Big Data Meets Patient Heterogeneity on the Road to Value. *Journal of Personalized Medicine*, 2016, vol. 6, no. 20. DOI: 10.3390/jpm6040020.

12. Doupe P., Faghmous J., Basu S. Machine Learning for Health Services Researchers. *Value in Health. The Journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research*, 2019, vol. 22 (7), pp. 808–815. DOI: 10.1016/j.jval.2019.02.012.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.060-070
УДК 004.942:338.27:332.63

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ИХ СВОЙСТВ*

Статья поступила в редакцию 18.10.2019, в окончательном варианте – 24.11.2019.

Савина Оксана Владимировна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, старший преподаватель, e-mail: nov1984@yandex.ru

Маликов Виталий Павлович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, аспирант, e-mail: axalter20@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: npsn1@ya.ru

Парыгин Данила Сергеевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-8834-5748, e-mail: dparygin@gmail.com, elibrary: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=842349

Митягин Сергей Александрович, Национальный исследовательский университет ИТМО, 199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 14, кандидат технических наук, директор Института дизайна и урбанистики, e-mail: mityagin@itmo.ru, elibrary: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=655152

Воронин Дмитрий Юрьевич, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33, кандидат технических наук, доцент, e-mail: voronin@sevsu.ru, elibrary: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=748964

Уточнена роль оценки недвижимости при исследовании организации городской инфраструктуры и развития страны в целом. Объект недвижимости рассмотрен как система, обладающая определенными характеристиками, главной из которых является стоимость. Стоимость описывает результат проведения оценки объекта недвижимости в условиях наличия большого количества критериев. Ее значение находится под влиянием некоторых факторов (параметров), которые можно разделить на две основные группы: внешние и внутренние. Рассматриваются основные подходы к построению рыночной оценки объекта недвижимости, основанные на различных видах машинного обучения. Предлагается новый подход к определению стоимости объектов недвижимости на основе комплексного анализа их свойств. Подход основывается на комбинировании метода бинарного кодирования качественных характеристик объекта недвижимости; кластерного анализа для определения однотипных объектов; регрессионного анализа для построения прогноза стоимости рассматриваемого объекта недвижимости. Предложенный метод комплексного анализа позволяет на основе исследования свойств объекта недвижимости и базовых принципов кадастровой оценки снизить неопределенность прогноза стоимости и повысить объективность оценок.

Ключевые слова: объект недвижимости, рынок недвижимости, рыночная стоимость объекта недвижимости, машинное обучение, бинарное кодирование, кластерный анализ

FORECASTING THE VALUE OF REAL ESTATE ON THE BASIS OF A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ITS PROPERTIES

The article was received by the editorial board 18.10.2019, in the final version – 24.11.2019.

Savina Oksana V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Senior Lecturer, e-mail: nov1984@yandex.ru

Malikov Vitaliy P., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: axalter20@gmail.com

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-20066 “мол_a_вед”.

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

Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-7214-9432, e-mail: npsn1@ya.ru

Parygin Danila S., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0001-8834-5748, e-mail: dparygin@gmail.com

Mityagin Sergey A., ITMO University, 14 Birzhevaya line, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Director of Institute of Design & Urban Studies, e-mail: mityagin@itmo.ru

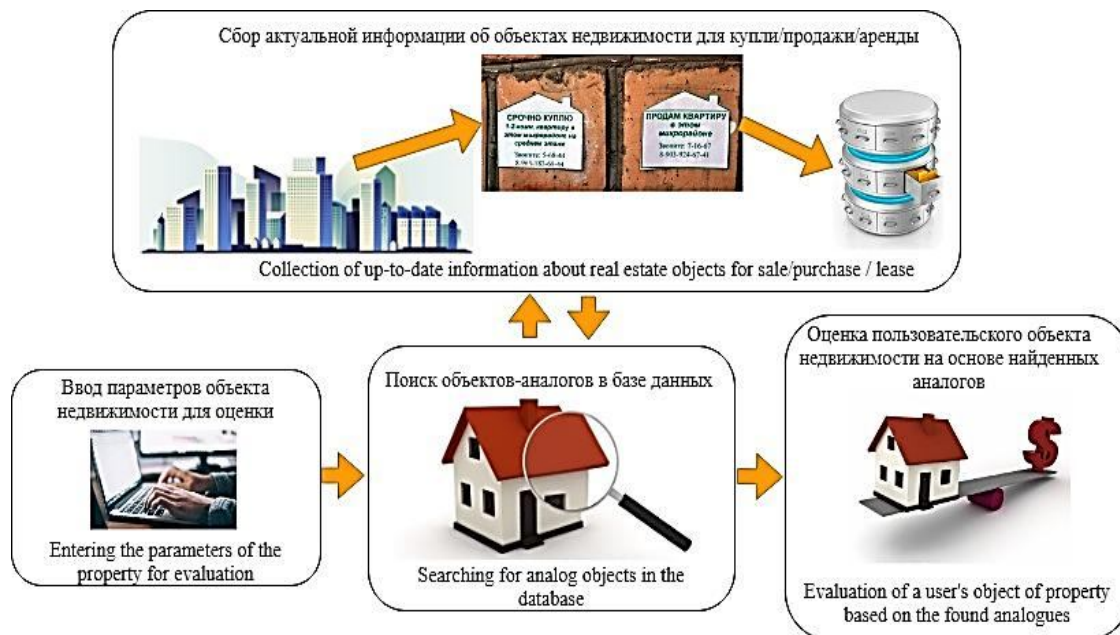
Voronin Dmitry Yu., Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: voronin@sevsu.ru

The role of real estate in the study of urban infrastructure development and the development of the country as a whole is substantiated in the paper. A real estate object is considered as a system with certain characteristics, the main of which is a cost. The cost describes the result of real estate object assessment in the presence of a large number of criteria. Its value is influenced by some criteria, which are divided into two main groups: external and internal. The basic approaches to building a market valuation of a property based on various types of machine learning are considered. A new approach to determining the value of real estate based on a comprehensive analysis of its properties is proposed. The approach is based on a combination of the binary coding method of the qualitative characteristics of a real estate object, cluster analysis to determine objects of the same type and regression analysis to build a value forecast for the particular real estate object.

Key words: estate object, estate market, market value of the property, machine learning, binary coding, cluster analysis

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Успешность решения множества вопросов по развитию территорий, связанных с формированием комфортной среды для проживания граждан, стимулированием развития экономики и обеспечением экологической безопасности территории, связано с эффективностью процессов управления недвижимостью. Объекты недвижимости (ОбН) выступают как основа национального богатства страны и связующее звено для разных поколений. Поэтому на сегодняшний день актуальным является вопрос о реорганизации процессов управления ОбН. Для всесторонней оценки поставленного вопроса необходимо рассмотреть специфику развития (создания) ОбН, его жизненный цикл и весь спектр его свойств; определить принципы управления, обеспечивающие рациональное использование данного ресурса.

Целью настоящего исследования является разработка методики для прогнозирования стоимости объекта недвижимости, с учетом уточненных свойств объектов недвижимости, влияющих на итоговую величину рыночной стоимости и базовых принципов кадастровой оценки.

Ключевые свойства объектов недвижимости. К ОбН относятся: здания, сооружения, объекты незавершенного строительства [3]; земельные участки; участки недр и всё, что прочно связано с землей, то есть объекты, перемещение которых без несоразмерного ущерба их назначению невозможно. Целостное представление об ОбН обусловлено совокупностью его правовых, физических и экономических составляющих, объединяющих и раскрывающих основные характеристики объекта недвижимости.

К основным чертам ОбН можно отнести следующее: уникальность (неповторимость) любого ОбН, заключающуюся в неповторимости его внутренней отделки, расположении относительно частей света, видовых характеристиках из окон, уровне износа, году постройки и т.д., а также новизность, стационарность (неподвижность), материальность, ликвидность, долговечность, высокую стоимость. Каждый из представленных признаков дает впоследствии свою составляющую в стоимости ОбН. Однако для того чтобы определить итоговую стоимость ОбН, необходимо в каждом сегменте объектов недвижимости выделить свою группу факторов, наиболее полно отражающую основные свойства данной группы. Например, к основным факторам, определяющим стоимость объекта жилой недвижимости, относят следующее: площадь, этажность, местоположение, состояние, совокупность передаваемых прав, наличие коммуникаций. Но основной компонентой из представленных параметров выступает местоположение (земельный участок, отведенный под объект недвижимости). Именно этот фактор [8] оказывается определяющим при формировании стоимости ОбН на разных стадиях развития жизненного цикла ОбН: от момента создания (появления идеи по созданию/развитию объекта, выполнения предпроектных исследований) до принятия решения о ликвидации (сносе) ОбН.

Вид определяемой стоимости на объект недвижимости. Действующие нормативно-правовые документы в области оценочной деятельности законодательно закрепили следующие виды стоимости на ОбН [11]:

- рыночная стоимость;
- инвестиционная стоимость;
- ликвидационная стоимость;
- кадастровая стоимость.

Каждая из этих стоимостей отражает основные задачи, поставленные перед государственными органами власти, по формированию и развитию рынка недвижимости; организации системы налогообложения, территориально-пространственному планированию города; регулированию общественного оборота внутри страны.

В рамках функционирования открытого рынка основной стоимостью является рыночная стоимость ОбН.

Согласно Федеральному закону от 29 июля 1998 г. № 135-ФЗ «Об оценочной деятельности в Российской Федерации», «под рыночной стоимостью объекта оценки понимается наиболее вероятная цена, по которой данный объект оценки может быть отчужден на открытом рынке в условиях конкуренции, когда стороны сделки действуют разумно, располагая всей необходимой информацией, а на величине цены сделки не отражаются какие-либо чрезвычайные обстоятельства, то есть когда:

- одна из сторон сделки не обязана отчуждать объект оценки, а другая сторона не обязана принимать исполнение;
- стороны сделки хорошо осведомлены о предмете сделки и действуют в своих интересах;
- объект оценки представлен на открытом рынке посредством публичной оферты, типичной для аналогичных объектов оценки;
- цена сделки представляет собой разумное вознаграждение за объект оценки и принуждения к совершению сделки в отношении сторон сделки с чьей-либо стороны не было;
- платеж за объект оценки выражен в денежной форме» [15].

Исходя из приведенного определения, основной упор при определении рыночной стоимости делается на доступность и открытость информации при оценке рыночной стоимости ОбН. При создании расчетной модели по оценке ОбН, как правило, ключевая задача состоит в сборе исходной полной информации по основным ценообразующим параметрам. Также немаловажен учет всей совокупности внешних факторов окружения проекта (условий совершения сделки).

Формирование стоимости на объект недвижимости. Стоимость ОбН формируется на разных этапах его жизненного цикла под влиянием внутренних (физических) и внешних факторов.

Внутренние (физические) факторы в большей степени отражают техническую составляющую объекта; дают представление о его объемно-планировочных, конструктивных решениях, составе материала. Данные сведения могут служить основой для определения сметной стоимости строительства, расчете стоимости воспроизводства или замещения. Однако для расчета рыночной или иной стоимости, утвержденной федеральным стандартом по оценочной деятельности, требуется обязательный учет внешних факторов (внешнего окружения объекта). Влияние данной группы факторов отражено в работах А. Г. Грязновой, М. А. Федотовой, В. А. Щербакова, Н. А. Щербаковой [4, 17]. Подробный анализ свойств ОбН представлен в работе [1].

На основе проведенного анализа была структурирована вся информация, связанная со свойствами объектов недвижимости, которые влияют на их стоимость; затем выделены 12 групп (табл. 1).

Таблица 1 – Внешние факторы, влияющие на стоимость ОбН

Группы факторов	Факторы
Социальные	– потребности в приобретении объектов жилой недвижимости, в варианте их использования; – чувство собственности; – потребности в общении с окружающими, отношение к соседним объектам и их владельцам; – тенденции изменения численности населения, его омоложения или старения, продолжительности жизни, размера семьи, плотности заселения, др.; – тенденции изменения уровня образования и культуры; – обеспеченность населения объектами социальной инфраструктуры; – миграционные процессы, уровень безработицы и преступности; – менталитет, стиль и уровень жизни
Экономические	– общее состояние мировой экономики; – экономическая ситуация в стране, регионе, на местном уровне; – уровень доходов населения и тенденции его изменения; – инфляционные процессы и платежеспособность населения; – доступность кредитных ресурсов и ставки процента; – наличие источников и условия финансирования строительства объектов; – затраты на создание и поддержание в работоспособном техническом состоянии объектов жилой недвижимости, тенденции их изменения; – затраты на жилищно-коммунальные услуги, связанные с использованием объектов жилой недвижимости, тенденции их изменения
Политико-правовые	– политическая стабильность и безопасность; – жилищная, налоговая и финансовая политика, предоставление разного рода льгот; – наличие и совершенствование законодательной базы в области операций с недвижимостью, в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства, экологии и пр.; – технические регламенты, строительные нормы и правила; – зонирование территорий
Природно-климатические	– природно-климатические и сейсмические условия; – природные ресурсы и источники сырья
Экологические	– уровень загрязнения атмосферы; – уровень шума; – техногенные аварии; – источники энергии
Административные	– принадлежность к муниципальному образованию; – деловая активность на рынке жилья; – транспортные условия и возможности для мобильности населения; – жилищные условия населения; – наличие специализированных институтов и информационное пространство на рынке жилья

Условия сделок	– мотивы продавцов и покупателей; – сроки осуществления; – особые условия сделок
Временные	– дата определения рыночной стоимости объекта жилой недвижимости; – период, на который определяется рыночная стоимость объекта жилой недвижимости
Местоположение	– размещение объекта в плане поселения по отношению к деловому центру, местам приложения труда, автодороге, железной дороге, побережью, зеленым массивам, коммунальным учреждениям (свалкам и т.п.); – наличие в округе объектов социальной инфраструктуры (магазины, школы, детские сады, поликлиники и пр.)
Физические характеристики придомовой территории	– характеристика земельного участка: размеры, форма, площадь, подъезды, благоустройство, озеленение, игровые площадки и т.д.; – общий внешний вид, безопасность, комфорт и привлекательность; – внешний вид соседних объектов недвижимости
Архитектурно-строительные характеристики здания	– стиль; – архитектурно-планировочные и объемно-конструктивные решения; – этажность, количество квартир, секций; – инженерные коммуникации; – функциональная пригодность конструкций и инженерных систем; – внешний вид
Финансово-эксплуатационные характеристики жилых помещений	– планировка и наличие удобств (холодное и горячее водоснабжение, вентиляция и пр., размер площади, количество помещений и т.д.); – пространственная ориентация (этаж, по сторонам света и т.д.); – техническое состояние; – качество отделки; – эксплуатационные расходы; – доходы, генерируемые объектом жилой недвижимости

По мнению авторов статьи, указанные факторы обладают свойствами «необходимости и достаточности».

Воздействие выявленных внешних факторов может происходить одновременно на различных стадиях жизненного цикла, а учитываться последовательно, в зависимости от условий и целей субъектов сделки.

Главные ценообразующие параметры, влияющие на стоимость ОбН. В зависимости от рассматриваемого сегмента рынка недвижимости формирование стоимости ОбН происходит под влиянием различных факторов. Среди исследований, относящихся к анализу и прогнозированию стоимости объектов недвижимости, можно выделить работы таких авторов, как Л.А. Лейфер и Г.М. Стерник [6, 13]

В работе [13] авторы излагают методологию по проведению инвестиционного анализа рынка недвижимости с учетом прогнозирования развития реализуемого инвестиционного проекта в рамках комплексной застройки.

В исследовании [6] авторы определяют величины основных коэффициентов, требуемых для установления рыночной стоимости ОбН. Методология данного исследования основана на анкетировании более 200 практикующих специалистов оценщиков и работников банка по 63 городам РФ. С помощью метода стратифицированного формирования выборки данных информация, относящаяся к одному городу, рассматривается как выборка в составе общей совокупности сведений. При этом обработка данных осуществляется в соответствии с эмпирическим байесовским подходом, который позволяет оценивать характеристики, относящиеся к конкретному населенному пункту с использованием всей совокупности данных.

На основе проведенного анализа были выделены группы ценообразующих параметров, влияющих на стоимость объектов для двух сегментов недвижимости: торгово-офисной (табл. 2) и жилой (табл. 3).

Таблица 2 – Главные ценообразующие характеристики для объектов недвижимости торгово-офисного назначения

Параметр	Описание
Местоположение	– удаленность микрорайона от центра города; – преимущественная застройка микрорайона (окружающая застройка)
Расположение относительно красных линий	– расположение относительно центральных магистралей (дорог) города; – просматриваемость фасада здания с центральных улиц (наиболее актуально для объектов торговой недвижимости)
Близость к остановкам общественного транспорта	– расположение относительно основных пешеходных потоков (свойственно в основном для объектов торговой недвижимости); – расположение рядом (в непосредственной близости) к остановкам общественного транспорта
Тип объекта	– отдельно стоящее здание/встроенное помещение
Общая площадь здания	– характеризует ликвидность объекта на рынке
Этажность/этаж расположения	– определяет востребованность и заполняемость объекта (преимущественное значение имеет для объектов торговой недвижимости)
Физическое состояние здания	– определяет физический износ здания; – указывает на требуемый объем капитальных затрат
Физическое состояние отделки помещений	– определяет физический износ помещения; – отражает презентабельность (современный вид) отделки помещений; – указывает на требуемый объем эксплуатационных затрат
Материал стен	– отражает группу капитальности, долговечность ОБН
Отношение арендопригодной площади к общей площади	– определяет уровень доходности объекта; – эффективность эксплуатации объекта
Наличие отдельного входа	– указывает на возможность преимущественного расположения по отношению к потоку клиентов (характерно для торговой недвижимости)
Ограничение доступа к объекту	– указывает на закрытость территории; – наличие ограничений по времени доступности объекта для клиентов [7]
Наличие парковки	– наличие сформированной площадки для временного хранения автомобилей

Таблица 3 – Главные ценообразующие характеристики для объектов недвижимости жилого назначения

Параметр	Описание
Местоположение	– удаленность микрорайона от центра города; – преимущественная застройка микрорайона (окружающая застройка)
Материал стен	– отражает группу капитальности объекта; – тип объекта (период постройки)
Общая площадь/количество комнат	– характеризует ликвидность объекта на рынке
Наличие коммуникаций	– отражает оснащенность объекта система инженерного обеспечения (водоснабжения, водоотведения, газоснабжения, электроэнергии)
Физическое состояние здания	– определяет физический износ здания; – указывает на требуемый объем капитальных затрат
Физическое состояние внутренней отделки	– определяет физический износ помещения; – отражает презентабельность (современный вид) отделки помещений; – указывает на требуемый объем эксплуатационных затрат
Благоустройство придомовой территории	– размещение на прилегающей территории малых архитектурных форм
Этажность/этаж	– характеризует тип объекта; – определяет видовые характеристики; – устанавливает возможность изменения функционального назначения
Близость остановок общественного транспорта	– характеризует транспортную (общественный транспорт) доступность к объекту
Близость к объектам рекреационного назначения	– близость к объектам водного, лесного фонда; – близость к городским паркам, скверам и т.д.

По мнению большинства экспертов-оценщиков, принимавших участие в исследовании рынка торгово-офисной и жилой недвижимости под руководством Л.А. Лейфера [6], наибольший удельный вес в стоимости объектов данного сегмента рынка принадлежит их местоположению.

Подходы к оценке стоимости объектов недвижимости. Классический расчет стоимости ОбН основан на применении трех подходов к оценке: затратного, доходного, сравнительного. Итоговый результат стоимости формируется после согласования трех полученных результатов. Как правило, в процессе оценки оценщик не всегда получает близкие значения для разных подходов. Поэтому требуется дополнительное экспертное обоснование по установлению долей для каждого из подходов. Их доля определяется на основании нескольких критериев. Каждому критерию присваивается ранг (балл). На основании итоговой суммы баллов по соответствующему подходу к общей сумме баллов определяется весовой коэффициент. На основании суммы удельных весов для каждого из подходов рассчитывается итоговая рыночная стоимость.

При этом важное значение имеет достоверность полученной исходной информации. Однако субъективное мнение экспертов при оценках зачастую является решающим. В связи с этим ужесточаются требования к организациям, осуществляющим оценочную деятельность. В соответствии с поправками, внесенными в Федеральный закон от 29 июля 1998 г. № 135-ФЗ «Об оценочной деятельности Российской Федерации», определен субъект оценочной деятельности и усилена его ответственность (вплоть до имущественной). Поэтому на сегодняшний день большую значимость приобретает создание объективных способов оценки, основанных на анализе доступных данных и использующих современные методы моделирования.

В данном направлении проведено множество исследований. В работе [14] автор предлагает подход к интеллектуальной обработке информации при построении оценки недвижимости. Разработка данного подхода представлена в виде интеграции программных средств Excel, STATISTICA, Matlab и реализована методами искусственных нейронных сетей, возможностями ГИС-технологий.

В статье [12] предложена методика определения стоимости квартир на вторичном рынке недвижимости в городе Волгограде. Эта методика основана на построении линейной модели регрессии. Анализ проводится на основе данных о площадях объектов (общая, жилая, площадь кухни) и типа дома (кирпич, бетон), к которому принадлежит квартира. В результате проведенного анализа автор делает выводы о том, что наиболее весомое влияние на итоговую стоимость квартир на вторичном рынке оказывают размеры объектов (их площади).

В работе [16] автор рассматривает возможность построения модели оценки рыночной стоимости недвижимости на основе нечеткой логики. В этом исследовании процесс оценки выполнялся над объектами, относящимися к типу «квартира». При этом использовались данные об их площади, привлекательности района, в котором они располагаются, и их стоимости. По полученным результатам автор представляет влияние местоположения объекта и его площади на итоговую стоимость.

В исследовании [9] авторы сравнивают применимость 4-х разных методов машинного обучения для прогноза стоимости недвижимости. Эти методы включают в себя регрессию опорных векторов, метод k-ближайших соседей, деревья регрессии и нейронные сети. Согласно полученным результатам, авторы делают вывод о том, что регрессионные модели показали наименьшую ошибку при построении прогнозов.

В документе [18] также представлены способы предсказания стоимости объектов недвижимости с использованием нескольких методов машинного обучения: метод случайного леса, множественная регрессия, регрессия опорных векторов, деревья регрессии с градиентным ускорением, нейронные сети. В данном исследовании наилучшие показатели продемонстрировал метод случайного леса, а наихудшие – множественная регрессия.

В статье [19] авторы описывают разработанную ими модель прогноза стоимости недвижимости в Китае, используя основные свойства объектов недвижимости и временные данные (даты постройки объекта). Прогнозирование цены основывается на регрессионном анализе.

Ни в одном из представленных исследований не использовались характеристики ОбН в совокупности, применялись лишь некоторые из них. В основном это объясняется наличием большого количества «категориальных» признаков, значения которых необходимо представлять в численном виде. Для этого нужно проводить дополнительную экспертную оценку, которая может повлиять на объективность итогового результата.

В связи с этим необходимо использование алгоритмов кодирования категориальных признаков без участия эксперта, т.е. применение алгоритмов машинного кодирования [20]. Одним из таких способов является метод One-Hot Encoding, или метод бинарного кодирования, который позволяет сгенерировать числовой код без потери информации.

Преобразование категориальных признаков к числовому виду заключается в представлении конкретного признака в виде n -мерного вектора, состоящего из $(n-1)$ нулей и одной единицы, где n – число категорий данного признака объекта. За «1» принимается та категория, к которой принадлежит исследуемый объект.

Применение метода бинарного кодирования обеспечивает использование большего числа характеристик ОбН при прогнозе их стоимости, а также повышает объективность результатов. Однако, несмотря на универсальность данного метода, в некоторых случаях его применение может быть осложнено в связи с существенным увеличением числа столбцов в матрице «объект – признак».

Таким образом, целесообразно предложить новый подход к оценке стоимости ОбН на основе комплексного анализа его свойств, который реализуется следующим набором действий:

- загрузка данных об ОбН с сайтов объявлений domino-rf.ru, itr.ru и restate.ru, а также с сайта торговой площадки etp-torgi.ru [10, 21];
- сохранение загруженной информации по ОбН в виде словарей;
- сохранение загруженной информации по ОбН в файл в формате JSON;
- считывание данных о пользовательском ОбН, для которого строится прогноз стоимости, из файла в формате JSON;
- формирование выборки, состоящей из «спарсенных данных» об ОбН, тип недвижимости которых совпадает с типом пользовательского объекта [2];
- отбор свойств объектов сформированной выборки, которые будут учитываться при построении модели недвижимости;
- обработка данных об ОбН в соответствии с существующими в сфере оценки недвижимости сводами правил, а также строительными нормами и правилами;
- преобразование категориальных признаков в числовой вид методом бинарного кодирования One-Hot Encoding;
- кластеризация сформированной выборки для определения кластера ОбН, к которому относится пользовательский объект;
- формирование «датасета» из выбранного кластера значений общей выборки для построения регрессионной модели прогноза стоимости ОбН [5];
- построение и обучение модели регрессии для прогноза стоимости ОбН, принадлежащих выбранному кластеру;
- построение прогноза стоимости пользовательского ОбН на основе характеристик полученной модели регрессии.

Метод реализован в системе комплексного анализа свойств объектов для оценки их стоимости (рис.). Эта система реализована на языке программирования Python версии 3.7 с использованием возможностей библиотек *Scrapy*, *json*, *numpy*, *pandas* и *sklearn*.

Апробация разработанной системы проводилась на данных о квартирах, подлежащих продаже в городе Волгограде. В результате работы модуля сбора данных был сформирован входной набор данных, состоящий из 35 тыс. объектов, информация о которых была собрана с сайтов domino-rf.ru, itr.ru, restate.ru, etp-torgi.ru.

Затем система отобрала ОбН, имеющие менее 50 % пропусков значений в свойствах. В результате, из входного набора данных были удалены 9 тыс. объектов. После чего система на основании оставшихся объектов проводит уточнение набора свойств, необходимых для построения оценки, выявляя коррелированные свойства.

Далее в процесс подготовки входного «датасета» (набора данных) включается процедура преобразования категориальных признаков объектов недвижимости в числовой вид за счет использования метода бинарного кодирования One Hot Encoding.

После проведения подготовительных работ с входными данными система строит модель регрессии для оценки пользовательского объекта недвижимости.

Для того чтобы наглядно продемонстрировать адекватность получаемых моделью результатов, из входного датасета случайным образом были отобраны 5 % записей от общего числа. Выбранные объекты в рамках эксперимента являются «пользовательскими», то есть для них разработанная система будет строить прогноз их стоимости. В таблице 4 представлен фрагмент полученных результатов.

Таблица 4 – Сравнение значений реальной и спрогнозированной стоимостей объектов недвижимости

ID записи	Реальная цена, руб.	Спрогнозированная цена, руб.
3	2400000	2246852
7	3550000	3260051
17	2700000	3104278
41	3600000	3474927
43	2900000	2718842
76	2640000	2830566
102	3100000	3205681
133	3500000	3919468

154	2500000	2105685
155	2700000	2593946
169	2550000	2501856
241	2680000	2740148
253	3000000	3395019
257	2350000	2058146
290	2800000	2657104
328	3200000	2970143
347	2760000	2849201
392	2580000	2896015
439	3350000	3081346
451	3150000	29508591

Для рассмотренного эксперимента модель обладает $R^2 = 0,836$ (относится к различиям показателей реальных и спрогнозированных стоимостей), что можно считать неплохим результатом.

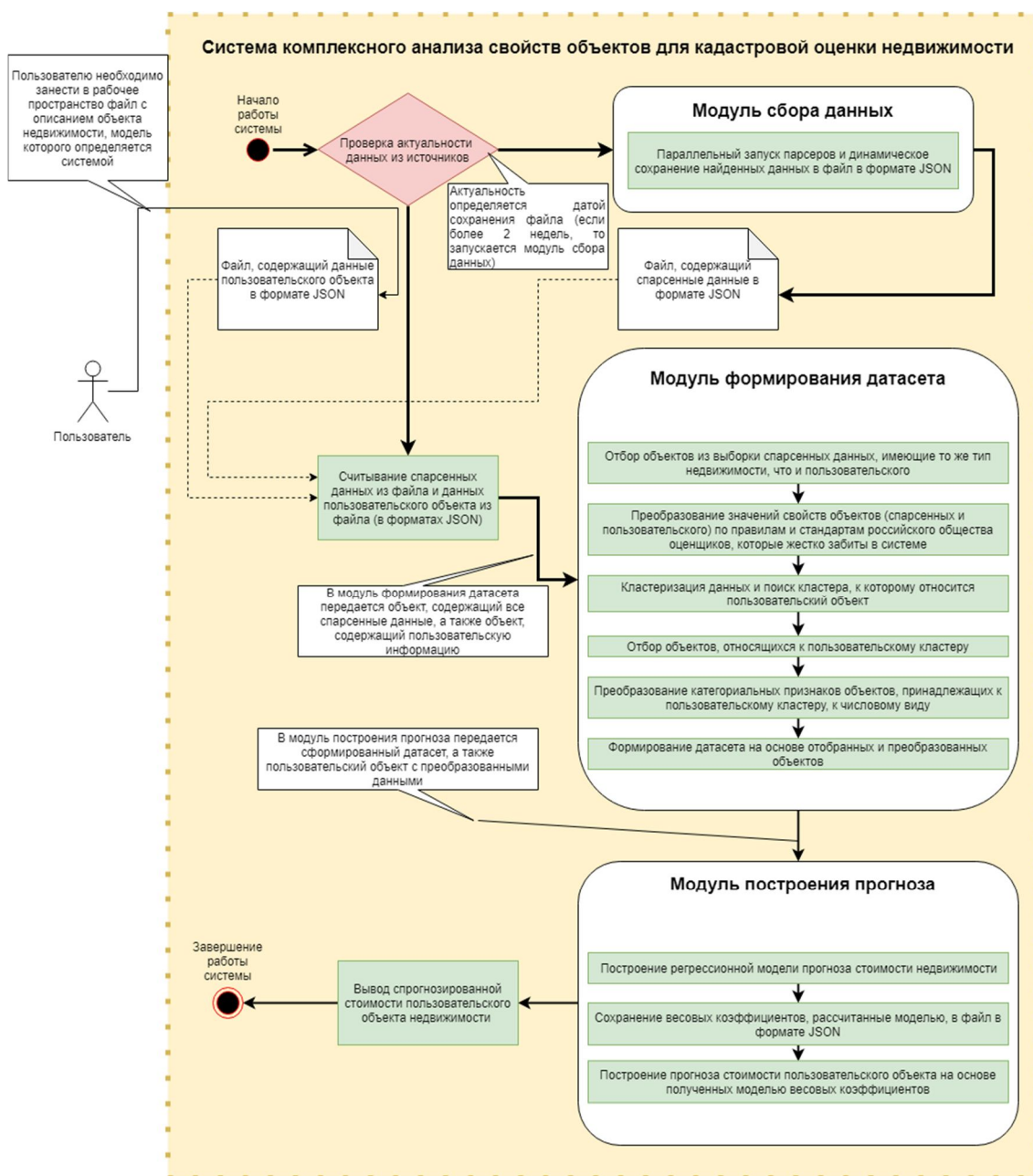


Рисунок – Метод комплексного анализа свойств объектов недвижимости

Данная система может использоваться для поддержки принятия решений в задачах анализа рынка недвижимости.

Выводы. В результате проведенного исследования дана характеристика ОБН, приведено его описание как системы. Рассмотрены основные виды стоимости ОБН и представлены основные факторы, влияющие на значение рыночной стоимости ОБН. Рассмотрены основные подходы к оценке стоимости ОБН. Предложен новый подход к оценке стоимости ОБН на основе комплексного анализа их свойств.

Библиографический список

1. Брумштейн Ю. М. Анализ моделей и факторов принятия решений о приобретении и обмене жилых помещений, управлении их комфортностью / Ю. М. Брумштейн, Т. Ю. Аксенова, Ю. Ю. Аксенова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2010. – № 3 (11). – С. 71–77.
2. Голубев А. В. Подход к интегрированной обработке открытых данных об инфраструктуре города / А. В. Голубев, Д. С. Парыгин, А. Г. Финогеев // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2. – С. 84–107. – Режим доступа: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-02/06-Golubev.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 № 51-ФЗ (ред. от 18.07.2019) // СПС Консультант Плюс.
4. Грязнова А. Г. Оценка бизнеса : учебник / А. Г. Грязнова, М. А. Федотова. – Москва : Финансы и статистика, 2009. – 736 с.
5. Зеленский И. С. Расчёт рейтинга объектов недвижимости на основе нормативов и пользовательских предпочтений / И. С. Зеленский, Д. С. Парыгин, Т. В. Смирнова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 221–233. – Режим доступа: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/01/ZelenskiySoavtori_1_19_1.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. Лейфер Л. А. Справочник оценщика недвижимости / Л. А. Лейфер. – Н. Новгород : Дятловы Горы, 2018. – 320 с.
7. Масаев С. Н. Оценка экономических параметров предприятия по глубокой переработке древесины методом корреляционной адаптометрии / С. Н. Масаев, Г. А. Доррер // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 1. – С. 38–43.
8. Масаев С. Н. Управление особыми экономическими зонами субъекта РФ / С. Н. Масаев // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления» (ВСПУ-2019) : сборник трудов конференции. Москва, 17–20 июня 2019 г. – Москва : ИПУ РАН, 2019. – С. 1773–1778.
9. Овчинникова И. Г. Интеллектуальная обработка информации в области оценки недвижимости / И. Г. Овчинникова, Л. В. Курзаева, В. Е. Петеляк, И. В. Гаврилова // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 2, вып. 3. – С. 58–60.
10. Парыгин Д. С. Применение рекомендательных технологий в системах с пространственной информацией / Д. С. Парыгин, А. С. Стрекалова, А. С. Гуртяков, С. Г. Адання, В. В. Пивоваров // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – № 1 (45). – С. 96–109. – Режим доступа: [http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(45\)/96-109.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(45)/96-109.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
11. Приказ Минэкономразвития России от 20.05.2015 № 298 «Об утверждении Федерального стандарта оценки «Цель оценки и виды стоимости (ФСО N 2)» // СПС Консультант Плюс.
12. Севостьянов А. В. Экономика недвижимости : учебник / А. В. Севостьянов. – Москва : КолосС, 2007. – 276 с.
13. Стерник Г. М. Анализ рынка недвижимости для профессионалов / Г. М. Стерник, С. Г. Стерник. – Москва : ЗАО «Издательство «Экономика», 2009. – 606 с.
14. Тиндова М. Г. Интеллектуальная обработка информации в области оценки недвижимости / М. Г. Тиндова // Прикладная информатика. – 2007 – № 5. – С. 3–10.
15. Федеральный закон от 29.07.1998 № 135-ФЗ (ред. от 03.08.2018) «Об оценочной деятельности в Российской Федерации» // СПС Консультант Плюс.
16. Чигиринская Н. В. Математическое моделирование оценки стоимости вторичного жилья на рынке недвижимости Волгограда / Н. В. Чигиринская // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – № 16 – С. 204–211.
17. Щербakov В. А. Оценка стоимости предприятия (бизнеса) / В. А. Щербakov, Н. А. Щербakov. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Омега-Л, 2012. – 315 с.
18. Breiman L. Random forests / L. Breiman // Machine learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32.
19. Baldominos A. Identifying Real Estate Opportunities Using Machine Learning / A. Baldominos, I. Blanco, A. J. Moreno, R. Iturrarte, Ó. Bernárdez, C. Afonso // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 11. – P. 2321–2345.
20. Parygin D. S. Categorical data processing for real estate objects valuation using statistical analysis / D. S. Parygin, V. P. Malikov, A. V. Golubev, N. P. Sadovnikova, T. M. Petrova, A. G. Finogeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – 7 p. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032102/pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
21. Cherkesov V. Parsing of Data on Real Estate Objects from Network Resource / V. Cherkesov, V. Malikov, A. Golubev, D. Parygin, T. Smykovskaya // Advances in Computer Science Research : Proceedings of the IV International Research Conference «Information technologies in Science, Management, Social sphere and Medicine» (ITSMSSM 2017), Tomsk, Russia, 5–8 December 2017. – Atlantis Press, 2017. – Vol. 72. – P. 385–388. – Режим доступа: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/itsmssm-17/25887911>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Brumshteyn Yu. M., Aksenova T. Yu., Aksenova Yu. Yu. Analiz modeley i faktorov prinyatiya resheniy o priobretenii i obmene zhilykh pomeshcheniy, upravlenii ikh komfortnostyu [Analysis of models and decision-making factors on the acquisition and exchange of residential premises, management of their comfort]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2010, no. 3 (11), pp. 71–77.
2. Golubev A. V., Parygin D. S., Finogeev A. G. Podkhod k integrirovannoy obrabotke otkrytykh dannykh ob infrastrukture goroda [The Approach to Integrated Processing of Open Data about the City Infrastructure] [Jelektronnyy resurs]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2018, no. 2, pp. 84–107. Available at: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-02/06-Golubev.pdf>.
3. *Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii (chast pervaya) ot 30.11.1994 № 51-FZ (red. ot 18.07.2019)* ["Civil Code of the Russian Federation (Part One)" dated November 30, 1994 no. 51-FL (as amended on July 18, 2019)]. *SPS Konsultant Plyus* [ATP Consultant Plus].
4. Gryaznova A. G., Fedotova M. A. *Otsenka biznesa : uchebnik* [Business valuation : textbook]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2009. 736 p.
5. Zelenskiy I. S., Parygin D. S., Smirnova T. V. Raschyot reytinga obektov nedvizhimosti na osnove normativov i polzovatel'skikh predpochteniy [Calculation of real estate rating based on standards and user preferences] [Jelektronnyy resurs]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technologies], 2019, vol. 7, no. 1, pp. 221–233. Available at: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/01/ZelenskiySoavtori_1_19_1.pdf.
6. Leyfer L. A. *Spravochnik otsenshchika nedvizhimosti* [Real Estate Appraiser]. N. Novgorod, Dyatlovyy Gory, Publ., 2018. 320 p.
7. Masaev S. N., Dorrer G. A. Otsenka ekonomicheskikh parametrov predpriyatiya po glubokoy pererabotke drevesiny metodom korrelyatsionnoy adaptometrii [Assessment of the economic parameters of the enterprise for deep processing of wood by the method of correlation adaptometry]. *Khvoynyye borealnoy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, vol. 37, no. 1, pp. 38–43.
8. Masaev S. N. Upravleniye osobymi ekonomicheskimi zonami subekta RF [Management of special economic zones of a subject of the Russian Federation]. *XIII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya : sbornik trudov konferentsii* [XIII All-Russian Meeting on Management Problems : Proceedings of the Conference], Moscow, June 17–20, 2019. Moscow, ICS RAS, 2019, pp. 1773–1778.
9. Ovchinnikova I. G., Kurzaeva L. V., Petelyak V. E., Gavrilova I. V. Intellektualnaya obrabotka informatsii v oblasti otsenki nedvizhimosti [Intellectual information processing in the field of real estate appraisal]. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Successes of Modern Science and Education], 2016, vol. 2, issue 3, pp. 58–60.
10. Parygin D. S., Strekalova A. S., A. S. Gurtyakov, S. G. Adannja, V. V. Pivovarov. Primenenie rekomendatel'nykh tekhnologiy v sistemakh s prostranstvennoy informatsiey [Application of recommender technologies in systems with spatial information]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2019, no. 1 (45), pp. 96–109. Available at: [http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(45\)/96-109.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(45)/96-109.pdf).
11. *Prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 20.05.2015 № 298 "Ob utverzhdenii Federalnogo standartata otsenki "Tsel ocenki i vidy stoimosti (FSO N 2)"* [Order of the Ministry of Economic Development of Russia of 05.20.2015 no. 298 "On approval of the Federal valuation standard "Purpose of valuation and types of value (FSO N 2)"]. *SPS Konsultant Plyus* [ATP Consultant Plus].
12. Sevostyanov A. V. *Ekonomika nedvizhimosti : uchebnik* [Real Estate Economics : textbook]. Moscow, KolosS Publ., 2007. 276 p.
13. Sternik G. M., Sternik S. G. *Analiz rynka nedvizhimosti dlya professionalov* [Analysis of the real estate market for professionals]. Moscow, ZAO «Izdatelstvo «Jekonomika», 2009. 606 p.
14. Tindova M. G. Intellektualnaya obrabotka informatsii v oblasti otsenki nedvizhimosti [Intellectual information processing in the field of real estate valuation]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2007, no. 5, pp. 3–10.
15. *Federalnyy zakon ot 29.07.1998 № 135-FZ (red. ot 03.08.2018) "Ob otsennochnoy deyatel'nosti v Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law of July 29, 1998 no. 135-FL (as amended on August 3, 2018) "On Valuation Activities in the Russian Federation"]. *SPS Konsultant Plyus* [ATP Consultant Plus].
16. Chigirinskaya N. V. Matematicheskoe modelirovaniye otsenki stoimosti vtorichnogo zhilya na rynke nedvizhimosti Volgograda [Mathematical modeling of the valuation of secondary housing in the real estate market of Volgograd]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2012, no. 16, pp. 204–211.
17. Shcherbakov V. A., Shcherbakova N. A. *Otsenka stoimosti predpriyatiya (biznesa)* [Assessment of the value of the enterprise (business)]. 4th ed., rev. and add. Moscow, Omega-L Publ., 2012. 315 p.
18. Breiman L. Random forests. *Machine learning*, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5–32.
19. Baldominos A., Blanco I., Moreno A. J., Iturrarte R., Bernárdez Ó., Afonso C. Identifying Real Estate Opportunities Using Machine Learning. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 11, pp. 2321–2345.
20. Parygin D. S., Malikov V. P., Golubev A. V., Sadovnikova N. P., Petrova T. M., Finogeev A. G. Categorical data processing for real estate objects valuation using statistical analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015. 7 p. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032102/pdf>.
21. Cherkessov V., Malikov V., Golubev A., Parygin D., Smykovskaya T. Parsing of Data on Real Estate Objects from Network Resource. *Advances in Computer Science Research : Proceedings of the IV International Research conference «Information technologies in Science, Management, Social sphere and Medicine» (ITSMSSM 2017), Tomsk, Russia, 5–8 December 2017*. Atlantis Press, 2017, vol. 72, pp. 385–388. Available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/itsmssm-17/25887911>.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.071-080
УДК 519.8, 004.942

ОЦЕНКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ РЕЗИДЕНТА ОСОБОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КАК ЗАДАЧА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ МНОГОМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

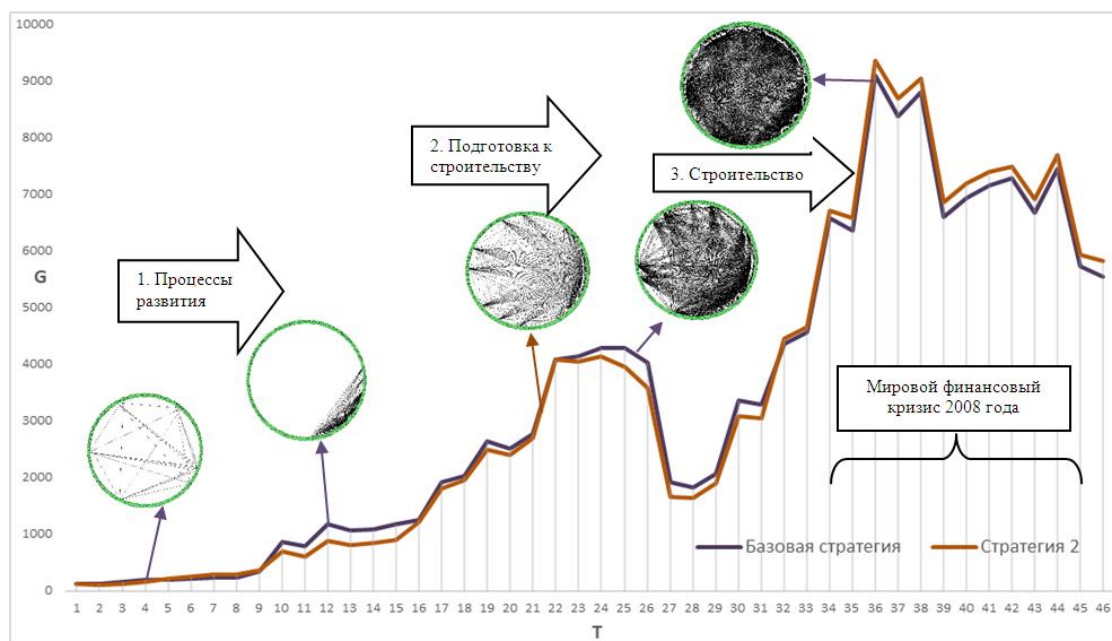
Статья получена редакцией 29.10.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

Масаев Сергей Николаевич, Сибирский федеральный университет, 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 82,
кандидат технических наук, e-mail: faberi@list.ru

При анализе существующих публикаций выявлено большое количество работ по оценке эффективности стратегии управления персоналом на предприятии. Однако не было обнаружено универсального метода для интегральной оценки результативности стратегии управления персоналом с учетом взаимосвязанности всех подсистем предприятия и влияния факторов внешней среды. Одним из оригинальных подходов к оценке результативности системы управления персоналом может служить использование интегрального показателя, так как он уже применялся для оценки взаимосвязанности функций и формирования управленческого решения на экономическом объекте. В настоящей работе метод интегральных показателей применяется для анализа стратегии управления персоналом предприятия резидента особой экономической зоны. С помощью авторского комплекса программ, охарактеризованного в тексте статьи, выполняется анализ по 1,2 млн значений на хорошо изученном экономическом объекте с идентифицированными на каждом временном такте пространствами: фактических данных, управления и параметров внешней среды. В эксперименте базовый режим работы системы ограничивают блокировкой выполнения (санкциями) некоторого набора функциональных обязанностей персонала. Исследование показало существенные изменения значений интегрального показателя, характеризующего состояние функциональных обязанностей экономического объекта при санкциях. Это позволило оценить следующее: влияние санкций на стратегию управления персоналом, затраты на противодействие санкциям, ущерб особой экономической зоне от санкций.

Ключевые слова: теория управления, система, особая экономическая зона, резидент, санкции, интегральные показатели, стратегия управления персоналом, функциональная обязанность

Графическая аннотация (Graphical annotation)



ASSESSMENT OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT STRATEGY OF THE RESIDENT A SPECIAL ECONOMIC ZONE AS THE TASK MODELING THE STATES OF MULTIDIMENSIONAL DYNAMIC SYSTEM

The article was received by the editorial board on 29.10.2019, in the final version – 25.11.2019.

Masaev Sergey N., Siberian Federal University, 79 Svobodnyy Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: faberi@list.ru

The research reveals a large number of works on assessing the effectiveness of a human resource management strategy in an enterprise without a universal method for an integrated assessment of a human resource management strategy, taking into account the interconnectedness of all enterprise subsystems and the influence of environmental factors. One of the original approaches to assessing the effectiveness of the human resource management strategy can be an integral indicator, since it has already been used to assess the interconnectedness of functions and the formation of a managerial decision in an enterprise. In this paper, the integral indicators method is used to analyze the human resource strategy of a resident enterprise of a special economic zone, as a multidimensional dynamic system. The analysis is performed at 1.2 million values using the author's software package, described in the text of the article, on a well-studied economic object with identified spaces at each time step: actual data, management and environmental conditions. In the experiment, the basic mode of operation of the system is limited by blocking the execution (sanctions) of a certain set of functional responsibilities of the personnel. The research showed significant changes in the values of the integral indicator and the state of the functional responsibilities of the economic object under sanctions and allowed us to assess: the impact of sanctions on the human resource management strategy, the costs of countering sanctions, the losses of the special economic zone from sanctions.

Key words: control theory, system, special economic zone resident, sanctions, integrated indicators, human resource management strategy, functional duty

Введение. В теории управления деятельность экономических объектов как систем изучается различными способами: с применением межотраслевых балансов, векторного, параметрического и нейросетевого моделирования; на основе использования агентного подхода и т.д. При этом контур управления персоналом в таких подходах не идентифицирован как отдельный объект для изучения. Одна из причин этого в том, что параметры, раскрывающие поведение персонала, не характеризуются функцией нормального распределения, поэтому выявить и интерпретировать в них закономерности сложно. Актуален вопрос оценки состояния экономического объекта как системы при выполнении сотрудниками своих функциональных обязанностей с различными ограничивающими их деятельность режимами и учетом влияния параметров внешней среды.

Вопросами управления экономическими системами занимались: В.В. Леонтьев и Л.В. Канторович, А.Г. Гранберг, А.Г. Аганбегян, В.Ф. Кротов и др. [1, 3–6, 8, 9, 14, 15]. Изучением особых экономических зон занимались в основном зарубежные авторы [6, 12, 16–41]. В 2009 г. автором настоящей статьи были предложены интегральные показатели для определения финансового кризиса 2008 г. на основе метода корреляционной адоптометрии [11]. В 2013 г. интегральные показатели были использованы как отдельный метод, что позволило охарактеризовать деятельность предприятия в различных условиях работы [13].

Цель настоящей работы – оценить состояние экономического объекта интегральным показателем как многомерную динамическую систему при выполнении персоналом своих функциональных обязанностей в базовом режиме и режиме санкций с неизвестными параметрами внешней среды.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- задать экономический объект (предприятие резидент ОЭЗ) как многомерную динамическую систему (далее система);
- в системе назначить выполняемым функциям перечень соответствующих им функциональных обязанностей персонала из должностных инструкций, сформировав тем самым набор функциональных обязанностей, характеризующий базовую стратегию управления персоналом;
- задать режим блокировки (санкции) выполнения некоторого набора функциональных обязанностей персонала из должностных инструкций;
- оценить интегральным показателем состояние параметров, характеризующих базовую стратегию управления персоналом и стратегию управления персоналом под влиянием санкций.

В работе используются следующие термины и сокращения:

- стратегия управления персоналом (далее – СУП) – набор функциональных обязанностей персонала предприятия, зафиксированных в должностной инструкции;
- особая экономическая зона (далее – ОЭЗ) – территория льготного режима налогообложения, где расположены предприятия (резиденты). Управляется субъектом РФ, в границах которого находится.

Для анализа состояния экономического объекта (предприятия) методом интегральных показателей представим экономический объект как систему S и приведем ее описание.

Используемый метод. Деятельность ОЭЗ задается стандартным рекуррентным уравнением [10], здесь его мы рассматривать не будем. Далее приведем описание предприятия – резидента ОЭЗ как системы без контура управления, так как в нашем случае необходимо отследить изменения состояния системы при мероприятиях, которые влияют на функциональные обязанности персонала и характеризующих СУП. Принятые управленческие решения, касающиеся следующих функций: объемов производства, продажи, реклама и т.д. [11], оставляем без изменения. Тогда хозяйственную деятельность предприятия резидента ОЭЗ достаточно представить как $S = \{T, X\}$, где $T = \{t: t = 1, \dots, T_{\max}\}$ – множество моментов времени с выбранным интервалом для анализа; X – пространство параметров системы; $x(t) = [x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)]^T \in X$ – n – вектор значений, соответствующий состоянию системы. Значения вектора $x^i(t)$ – величина финансовых расходов и доходов предприятия. Размерность системы n равна 1,2 млн параметров. На основании параметров X и T считаем наш экономический объект многомерной динамической системой (далее по тексту система).

Анализ системы в момент t выполняется по $x(t)$ за k предыдущих тактов. Параметр k – длина отрезка временного ряда (в работе принято $k = 6$ месяцев). Тогда имеем матрицу

$$X_k(t) = \begin{bmatrix} x^T(t-1) \\ x^T(t-2) \\ \dots \\ x^T(t-k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^1(t-k) & x^2(t-k) & \dots & x^n(t-k) \\ x^1(t-k) & x^2(t-k) & \dots & x^n(t-k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x^1(t-k) & x^2(t-k) & \dots & x^n(t-k) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Величину временного ряда k можно использовать для идентификации частоты влияния внешних факторов на систему. Вопрос рассмотрен отдельно в работе [12].

Следуя методу интегральных показателей [13], рассчитываем коэффициенты взаимной корреляции между значениями параметров $x(t)$, характеризующих состояние системы за весь период хозяйственной деятельности экономического объекта (предприятия). Получаем корреляционную матрицу $R_k(t)$:

$$R_k(t) = \frac{1}{k-1} X_k^T(t) X_k(t) = \left\| r_{ij}(t) \right\|, \quad (2)$$

$$r_{ij}(t) = \frac{1}{k-1} \sum_{l=1}^k x^i(t-l) x^j(t-l), \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где t – моменты времени; $r_{ij}(t)$ – коэффициенты корреляции переменных $x^i(t)$ и $x^j(t)$ в момент времени t .

Далее формируем один из четырех интегральных показателей, сумму абсолютных значений коэффициентов корреляции, показатель экспресс-оценки степени коррелированности параметров системы $G_i(t)$:

$$R_i(t) = G_i(t) = \sum_{j=1}^n |r_{ij}(t)|. \quad (4)$$

Состояние всей системы рассчитывается как:

$$G = \sum_{i=1}^{T=\max} \sum_{i=1}^n G_i(t) \quad (5)$$

Стратегия управления персоналом V – это набор функциональных инструкций всего персонала. Эту стратегию можно представить как V_i^k набор стратегий управления персоналом:

$$V = \sum_{i=1}^{T=\max} \sum_{i=1}^n V_i^k(t). \quad (6)$$

Проведем идентификацию выполняемых функций системы с выполняемыми функциональными обязанностями персонала, тогда каждая стратегия управления персоналом V_i^k охарактеризована функциональными обязанностями персонала:

$$V_i^k = \sum_{i=1}^n v_i^j(x_j^i) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где v_i^j – функциональная обязанность сотрудника, прописанная в должностной инструкции (соответствие x_j^i задается v_i^j как 1 – да, 0 – нет); x_j^i – затраты на i -ю функциональную обязанность на предприятии для j -го сотрудника. Уровень автоматизации функциональных обязанностей учитываем как работу, выполненную в рамках должностной инструкции оператора автоматизированного процесса.

Тогда санкции – это набор заблокированных функциональных обязанностей v_i^j в векторе значений

$$v(t) = [v^1(t), v^2(t), \dots, v^n(t)]^T \in V - n \text{-размерностью, характеризующий состояние СУП.}$$

Оплата функциональных обязанностей работников экономической системы ограничена ресурсами C , тогда $V(X) \leq C$. Данное ограничение распространяется на все подсистемы исследуемой системы.

Реализация метода выполняется в авторском комплексе программ, описываемом далее.

Авторский комплекс программ. Этот комплекс состоит из четырех отдельных программных средств:

1. Программный комплекс для расчета экономической модели функционирования предприятия, занимающегося заготовкой и глубокой переработкой различных пород древесины при определенных сценариях развития рынка и стратегии (Свидетельство РосПатента о регистрации программы для ЭВМ № 2013614410.2013). В программе моделируется не только деятельность предприятия лесной отрасли, также она используется для моделирования любого экономического объекта (предприятия) как системы, определения структуры взаимодействия переменных, моделирования управленческого решения, структуры взаимодействия переменных в управляющем воздействии, моделирования частот внешней среды, действующих на систему.

2. Оценка достижения выбранной стратегии предприятия по универсальным показателям бизнес-функций производственных процессов и процессов управления (Свидетельство РосПатента о регистрации программы для ЭВМ № 2017616973.2016). Используется для увязки параметров системы с выбранным методом управления. Позволяет выбрать удобную форму интерпретации данных по синтаксису метода управления.

3. Программный комплекс оценки эффективности управленческого решения (Свидетельство РосПатента о регистрации программы для ЭВМ № 2008610295.2007). Используется метод Р. Беллмана для оценки оптимальности управленческих решений [34].

4. Автоматизированный расчет и заполнение форм экономической оценки инвестиционных проектов в соответствии с постановлением Совета администрации Красноярского края «О государственной поддержке инвестиционной деятельности 91-П» (Свидетельство РосПатента о регистрации программы для ЭВМ № 2017616970.2016). Используется для моделирования оптимального режима налоговых ставок со стороны субъекта РФ (края, региона и т.д.) для стимулирования развития предприятий резидентов ОЭЗ.

Данный программный комплекс задействован для выполнения алгоритма проведения эксперимента.

Алгоритм эксперимента. Номер шага в алгоритме совпадает с номером выполняемой программы из авторского комплекса программ, описанного выше.

1 шаг. Загружаем данные о фактической деятельности экономического объекта $x^i(t)$, данные по управлению за прошлые периоды времени и данные, характеризующие внешнюю среду. Идентифицируем экономический объект (модель) как многомерную динамическую систему. Блокируем

выполнение функциональных обязанностей инженерного персонала (применяем санкции). Рассчитываем интегральный показатель по всем состояниям системы. Задаем целевую функцию. Если данные характеризуют объект, то переходим к шагу 2, иначе повторяем 1 шаг.

2 шаг. В загруженной модели выбираем форму представления метода управления. Например, РМВОК, бюджетирование, формула Кобба – Дугласа, V-образная модель управления проектом, система менеджмента качества, метод оценки жизненных циклов (продукции, предприятия, стратегии) и т.д. Дополнительные примеры можно посмотреть в отдельных работах [2, 7, 13]. В нашем случае управляем состоянием системы через разработку СУП, которая характеризуется режимами выполнения функциональных обязанностей персонала v_i^j (7). Проверяем полноту описания системы выбранной методикой. Если синтаксис метода управления удовлетворяет нашим требованиям, то переходим к шагу 3, иначе возвращаемся к подбору новой методики управления шаг 2. Если методика для управления не найдена, но описание и управление системы только по наименованию переменных $x^i(t)$ нас удовлетворяет, то переходим к шагу 3, иначе 1 шаг.

3 шаг. Проверяем управление на оптимальность [34]. Если решение не оптимально, по заданным целевым функциям, и не устраивает нас, то возвращаемся на шаг 1, иначе переходим к шагу 4.

4 шаг. Оцениваем эффективность управляющих воздействий (инвестиционной политики) субъекта РФ для предприятий резидентов ОЭЗ в границах работы особой экономической зоны. Если эффективность нас не устраивает, то задаем новые управляющие воздействия со стороны субъекта РФ и переходим к шагу 1, иначе конец алгоритма. В настоящем эксперименте параметры инвестиционной политики не меняются. С изменением режимов управления в ОЭЗ можно ознакомиться в отдельных работах [10].

Алгоритм выполняется по параметрам объекта исследования.

Характеристика объекта исследования. В качестве экономического объекта для исследования используется строительное предприятие, созданное в 2002 г. Предприятие выполняло строительство 4 жилых домов. Наблюдение за ним велось с декабря 2003 г. до середины 2008 г. (52 периода). Необходимость использования данного предприятия в качестве примера обусловлена тем, что необходимо зафиксировать изменения состояния системы от изменения параметров, характеризующих результат применения управляющих действий на функциональные обязанности персонала (стратегия управления персоналом) в хорошо изученном реально действующем экономическом объекте. Проще говоря, не пересматриваются уже принятые управляющие воздействия, чтобы не смешивать реакцию системы на них с исследуемыми управляющими воздействиями (функциональные обязанности персонала). На данном объекте уже были определены: границы пространства системы, матрицы, определяющие структуру пространства данных и пространства управляющих воздействий, возможность применения интегрального показателя для оценки состояния экономического объекта и оценка им качества управляющих воздействий. Пространство X системы S характеризуется параметрами: описанием проекта и собственников, основных средств, характеристикой продукции, анализом рынка, организационным планом, маркетинговыми данными, структурой производства (склады, логистика), анализом норм расхода ресурсов, воздействием на окружающую среду, анализом проектных рисков, финансовой моделью доходов и расходов. Важные события в системе (рис. 1): утверждение рабочей документации в 22 периоде; получение лицензии на строительство в 32 периоде; внедрение системы менеджмента качества в 34 периоде; открытие кредитной линии в 40 периоде; старт строительства в 42 периоде; открытие дочернего предприятия в 44 периоде. С 34 периода на предприятие действует мировой финансовый кризис. Детальная характеристика вышеописанных данных приведена в предыдущей работе [11]. В 2006 г. лично автором выполнено внедрение автоматизированной системы управления данными на предприятии для анализа его деятельности. Вышеперечисленные параметры вводятся в программный комплекс при выполнении алгоритма на шаге 1 для моделирования состояний системы в различные моменты времени с различным управляющим воздействием.

Результаты эксперимента. Без режима санкций система имеет исходный набор выполняемых функциональных обязанностей персонала, характеризующих СУП (V_1^6 – базовая стратегия), и значение показателя равно 153 080 см (рис.). Введен ограничивающий режим (санкции), через исключение из деятельности, важного для строительства, инженерного персонала. Перечень функциональных обязанностей персонала, заблокированных санкциями: *инженер-проектировщик* в период 1–19 – обеспечение технической документацией строительного участка и в периоды 38–42, 50–54, 62–66 – разработка технических заданий; *инженер технического отдела* в период 1–20 – разработка технических решений, в период 28–36 – разработка проектов производства работ; *инженер-*

конструктор в период 1–27 – участие в монтаже конструкций, испытаниях и сдаче в эксплуатацию, в период 28–70, в период 71–73 – участие в монтаже конструкций. Весь перечень функциональных обязанностей, заблокированных санкциями, представлен в таблице.

Таблица – Заблокированные санкциями функциональные обязанности стратегии V_1^6

Период (t)	Должность сотрудника	Функциональные обязанности v_i^j
1–19	Инженер-проектировщик	Обеспечение технической документацией строительный участок
38–42		Разработка технических заданий
50–54		
62–66		
1–20	Инженер технического отдела	Создание технических решений
28–36		Создание проектов производства работ
1–27	Инженер-конструктор	Контроль монтажа конструкций, испытаний и сдачи объектов в эксплуатацию
28–70		Проектирование основных разделов проекта
71–73		Руководство и участие в монтаже конструкций
1–32	Архитектор	Осуществление авторского надзора за строительством, участие в семинарах и конференциях
50–51		Авторский надзор
62–63		
1–18	Главный инженер	Согласование проектов
66–73		Авторский надзор
38–39		
1–20	Начальник участка	Осуществление технического контроля за выполнением СМР; приемка законченных объемов
25–26		Учет материалов
38–39		
50–51		
62–63		
1–20, 25, 38, 50, 62	Прораб	Выполнение СМР
1–20	Инженер ПТО	Определение объемов выполненных работ; выполнение КС-2, КС-3; формирование документации
1–20	Инженер тех. надзора	Ведение учета законченных СМР и составление отчетности о выполнении планов
1–20	Инженер по охране труда	Осуществление контроля за выполнением мероприятий по охране труда

Заблокированные функциональные обязанности инженерного персонала v_i^j влияют на выполнение x_j^i функций системы (7). Значение СУП в режиме санкций (V_2^6 – Стратегия 2) равно 155 896 (рис.).

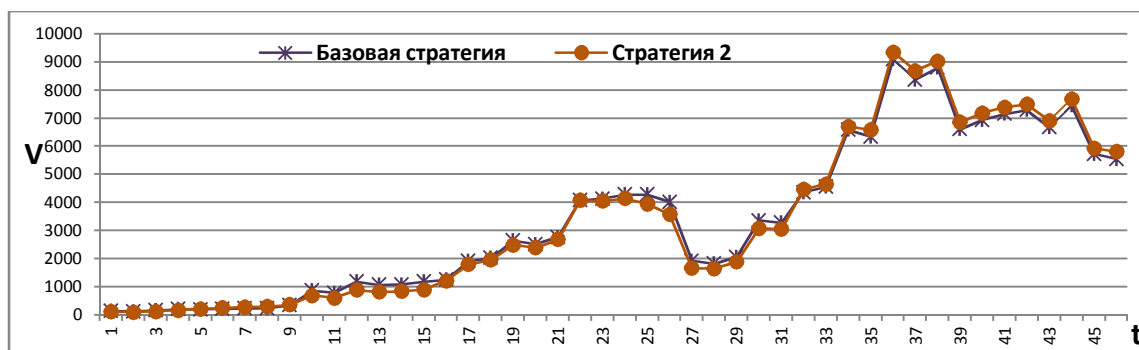


Рисунок – Динамика значения $V_i(t)$ по двум смоделированным вариантам развития компании

Заблокированные санкциями функциональные обязанности возможно восстановить в течение 2 месяцев за счет привлечения услуг сторонних организаций на сумму 148,5 млн руб., что эквива-

лентно удорожанию на 10 % финансовой стоимости всего проекта за 4 года. Тогда влияние санкций на систему измеряется как разность между состоянием параметров СУП $\Delta V = V_1^6 - V_2^6$ и ΔV равно минус 2 816. Величина $V_2^6 > V_1^6$ в силу более высокой полифакторности реакции системы на более трудные для нее условия. Эффект полифакторности в системах подобно раскрыт в отдельной работе [11].

Потери ОЭЗ от введенных санкций за 4 года составят 61,63 млн руб.

Обсуждение полученных результатов. Эксперимент блокирования выполнения функциональных обязанностей персонала условно идентичен введенным Австрией санкциям против одного из дочерних обществ Газпрома. По данным публичных источников от 16.10.2019 г., известно, что австрийская компания LMF принудительно через спутник отключила компрессора, тем самым заблокировала функциональные обязанности инженерного персонала по перекачке газа. Газпром заявил, что имеет возможность заменить оборудование и решит эту проблему не позднее 5 месяцев.

Другой реальный процесс, который условно идентичен вводимым санкциям в эксперименте, – это эмиграция инженерно-технического персонала вместе с семьей из страны на другую работу, что тормозит развитие экономического объекта на 2–4 месяца. Ущерб экономической деятельности наносится не только предприятию, где идет остановка выполнения функциональных обязанностей, но и экономической системе большего порядка: региону, краю, стране. Данный синергетический ущерб мало изучен, что может служить одним из стимулов дальнейших исследований в этом направлении.

Заключение. Задачи, поставленные в начале работы, выполнены.

1. Задан экономический объект (предприятие, резидент ОЭЗ) как многомерная динамическая система S по параметрам пространств X и T .

2. Назначены выполняемым функциям системы x_j^i функциональные обязанности v_i^j из должностных инструкций, сформировав тем самым набор должностных инструкций, характеризующий базовую стратегию управления персоналом V_i^k . Стратегию управления персоналом определили как $V_i^k = \sum_{j=1}^n v_i^j(x_j^i)$.

3. Задан режим блокировки (санкций) выполнения функциональных обязанностей v_i^j из должностных инструкций персонала.

4. Дана оценка интегральным показателем двух состояний, базовой стратегии управления персоналом $V_1^6 - 153\,080$ и стратегии управления персоналом с санкциями $V_2^6 - 155\,896$, описываемые вектором $v(t) = [v^1(t), v^2(t), \dots, v^n(t)]^T \in V$.

Выполнено сравнение экспериментальных данных с реальными ситуациями.

Цель, поставленная в начале работы, оценить состояние экономического объекта интегральным показателем как многомерную динамическую систему при выполнении персоналом своих функциональных обязанностей в базовом режиме и режиме санкций с неизвестными параметрами внешней среды достигнута.

Библиографический список

1. Аганбегян А. Г. Экономика России на распутье... Выбор посткризисного пространства / А. Г. Аганбегян. – Москва : АСТ, Астрель ; Владимир : ВКТ, 2010. – 185 с.
2. Бережнова А. В. Управление процессами комплексной стандартизации деятельности предприятия: магистерская диссертация: 38.04.01 / А. В. Бережнова. – Красноярск : СФУ, 2016. – Режим доступа: <http://elibrary.sfu-kras.ru/handle/2311/28693>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Бурков В. Н. Механизмы функционирования социально-экономических систем с сообщением информации / В. Н. Бурков, А. К. Еналеев, Д. А. Новиков // АиТ. – 1996. – № 3. – С. 3–25.
4. Бурков В. Н. Модели и методы управления организационными системами / В. Н. Бурков, В. А. Ириков. – Москва : Наука, 1994.
5. Гранберг А. Г. Василий Леонтьев в мировой и отечественной экономической науке / А. Г. Гранберг // Экономический журнал ВШЭ. – 2006. – № 3. – С. 471–491.
6. Гранберг А. Г. Основы региональной экономики / А. Г. Гранберг. – 4-е изд. – Москва : Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004. – 495 с.
7. Евдокименко Е. А. Оценка финансовой деятельности предприятия на основе эффективности бизнес-процессов : магистерская диссертация: 38.04.01 / Е. А. Евдокименко. – Красноярск : СФУ, 2018.
8. Канторович Л. В. Математико-экономические работы / Л. В. Канторович. – Новосибирск : Наука, 2011. – 760 с.

9. Кротов В. Ф. Основы оптимального управления / В. Ф. Кротов. – Москва : Высшая школа, 1990. – 430 с.
10. Масаев С. Н. Динамическое уравнение для управления особой экономической зоной субъекта РФ / С. Н. Масаев // Уравнения типа свертки в науке и технологиях (ECTST–2019) : тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения Ю.И. Черского (г. Мисхор – Симферополь, 25–28 сентября 2019 г.). – Симферополь : Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2019. – С. 49–51.
11. Масаев С. Н. Методика комплексной оценки управленческих решений в производственных системах с применением корреляционной адаптометрии : автореф. / С. Н. Масаев. – М., 2011.
12. Масаев С. Н. Определение горизонта планирования автокорреляционной функцией в процессе управления предприятием особой экономической зоны / С. Н. Масаев // Технологии разработки информационных систем (ТРИС-2019) : материалы конференции IX Международной научно-технической конференции (г. Таганрог, 6–13 сентября 2019 г.). – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2019. – Т. 1. – С. 52–59.
13. Масаев С. Н. Оценка управления в компании методом интегральных показателей компании для шести вариантов ее развития / С. Н. Масаев // Решетневские чтения. – Красноярск : СибГАУ. – Т. 2. – 2013. – С. 133–134.
14. Немчинов В. С. Потребительная стоимость и потребительские оценки / В. С. Немчинов // Экономико-математические методы. – Москва : Изд-во АН СССР, 1963. – Вып. 1.
15. Новиков Д. А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д. А. Новиков. – Москва : Фонд «Проблемы управления», 1999.
16. Aggarwal A. Special Economic Zones in South Asia: Industrial Islands or Vehicles for Diversification? / A. Aggarwal et al. – Washington, DC : International Trade Department, the World Bank, 2008.
17. Bai X. J. Performance Evaluation of China's Hi-tech Zones in the Post Financial Crisis Era – Analysis Based on the Dynamic Network SBM Model / X. J. Bai, W. K. Yan & Y. H. Chiu // China Econ. Rev. – 2015. – Vol. 34. – P. 122–134.
18. Binazadeh T. New Approach in Guidance Law Design Based on Finite-Time Partial Stability Theorem / T. Binazadeh, M. H. Shafiei, E. Bazregarzadeh // Journal of Space Science and Technology. – 2015. – Vol. 8. – P. 1–7.
19. Bräutigam D. A. Going Global in Groups: Structural Transformation and China's Special Economic Zones Overseas. World Development / D. A. Bräutigam and X. Tang. – 2014. – P. 63.
20. Chen H. Global Finite-Time Partial Stabilization for a Class of Nonholonomic Mobile Robots Subject to Input Saturation / H. Chen, B. Y. Li, B. W. Zhang, L. Zhang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2015. – Vol. 12, no. 11. – P. 159.
21. Chen J. Social Cost-Benefit Analysis of China's Shenzhen Special Economic Zone / J. Chen // Development Policy Review 11. – 1993. – № 3. – P. 261–271.
22. China Development Zones Association. China Development Zones Yearbook. – Beijing : China Financial & Economic Publishing House, 2011.
23. Farole Thomas. Special Economic Zones in Africa: Comparing Performance and Learning from Global Experience / Farole Thomas. – Washington, DC : World Bank, 2011.
24. FIAS. Special Economic Zones: Performance, Lessons Learned, and Implications for Zone Development. – Washington, DC : World Bank, 2008.
25. Golestani M. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability / M. Golestani, I. Mohammadzaman, M. J. Yazdanpanah // Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 85, № 1. – P. 87–96.
26. Haddad W. M. Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control / W. M. Haddad, A. L'Afflitto // Journal of the Franklin Institute. – 2015. – Vol. 352, no. 6. – P. 2329–2357.
27. Jammazi C. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control / C. Jammazi, A. Abichou // Journal of Mathematical Control and Information. – 2018. – Vol. 35, № 1. – P. 249–277.
28. Jenkins M. et al. Export Processing Zones in Latin America / M. Jenkins et al. // Harvard Institute for International Development, Development Discussion Paper. – 1998. – № 646 (August).
29. Kumar A. A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing / A. Kumar, R. Shankar, A. Choudhary, L. S. Thakur // International Journal of Production Research. – 2016. – Vol. 54 (23). – P. 7060–7073.
30. L'Afflitto A. Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control / A. L'Afflitto // International Journal of Control. – 2017. – Vol. 90, № 9. – P. 1861–1878.
31. Neveling P. Free Trade Zones, Export Processing Zones, Special Economic Zones and Global Imperial Formations 200 BCE to 2015 CE. The Palgrave Encyclopedia of Imperialism and Antiimperialism / P. Neveling. – Basingstoke : Palgrave Macmillan, 2015.
32. Pavlov P. V. Special economic zones as a key to sustainable economic development of Russia / P. V. Pavlov, A. V. Vetkina // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS CIEDR 2018. – Future Academy, 2019. – P. 350–357.
33. Qrunfleh S. Supply chain management practices – IT utilisation alignment: Impact on supply chain performance and firm performance / S. Qrunfleh, M. Tarafdar // International Journal of Business Information Systems. – 2015. – Vol. 18 (4). – P. 364–389.
34. Bellman R. Dynamic programming / R. Bellman. – New Jersey : Princeton University Press, 1957.

35. Rahoof A. T. An Evaluation of Special Economic Zones (SEZs) Performance Post SEZs Act 2005 / A. T. Rahoof, P. G. Arul // *Universal Journal of Industrial and Business Management*. – 2016. – № 4 (2), – P. 44–52.
36. Rajpurohit T. Stochastic Finite-Time Partial Stability, Partial-State Stabilization, and Finite-Time Optimal Feedback Control / T. Rajpurohit, W. M. Haddad // *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. – 2017. – Vol. 29, no. 2. – P. 10.
37. Schminke A. Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China / A. Schminke, J. Van Biesebroeck // *Review of World Economics (Weltwirtschaftliches Archiv)*. – Springer ; Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013. – Vol. 149 (2). – P. 343–367.
38. Wei L., Hong-Bo S., Zhe Z., Sang-Bing T., Yuming Z., Quan C., & Jiangtao W. The Development Evaluation of Economic Zones in China / L. Wei , S. Hong-Bo , Z. Zhe, T. Sang-Bing , Z. Yuming, C. Quan, W. Jiangtao // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2018. – № 15 (56). – P. 1–14.
39. Weyer S. Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems / S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer, D. Gorecky // *Proceedings of IFAC-PapersOnLine*. – 2015. – Vol. 48, issue 3. – P. 579–584.
40. Zhong R. Y. Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors / R. Y. Zhong, C. Xu, C. Chen, G. Q. Huang // *International Journal of Production Research*. – 2015. – P. 2610–2621.
41. Zohir S. C. Gender balance in the EPZ: A socio-economic study of Dhaka export processing zone in Bangladesh / S. C. Zohir. – Bangladesh Institute of Development Studies, 2001.

References

1. Aganbegyana A. G. *Ekonomika Rossii na raspute... Vybor postkrizisnogo prostranstva* [The Russian economy at a crossroads ... The choice of post-crisis space]. Moscow, AST Publ., Astrel Publ. ; Vladimir, VKT Publ., 2010. – P. 185.
2. Berezhnova A. V. *Upravlenie protsessami kompleksnoy standartizatsii deyatel'nosti predpriyatiya* [Management of the processes of integrated standardization of the enterprise]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2016.
3. Burkov V. N., Enaleev A. K., Novikov D. A. *Mekhanizmy funktsionirovaniya socialno-ekonomicheskikh sistem s soobshcheniem informatsii* [Mechanisms of the functioning of socio-economic systems with information]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1996, no. 3, pp. 3–25.
4. Burkov V. N., Irikov V. A. *Modeli i metody upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Models and methods of managing organizational systems]. Moscow, Nauka, 1994.
5. Granberg A. G. Vasilii Leontev v mirovoy i otechestvennoy ekonomicheskoy nauke [Vasily Leontiev in world and domestic economic science]. *Ekonomicheskii zhurnal VSHE* [Economic Journal of Higher School of Economics], 2006, no. 3, pp. 471–491.
6. Granberg A. G. *Osnovy regionalnoy ekonomiki* [Fundamentals of regional economics]. 4th ed. Moscow, 2004. 495 p.
7. Evdokimenko E. A. *Otsenka finansovoy deyatel'nosti predpriyatiya na osnove effektivnosti biznes-processov* [Assessment of the financial activities of the enterprise based on the effectiveness of business processes]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2018.
8. Kantorovich L. V. *Matematiko-ekonomicheskie raboty* [Mathematical and economic works]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 760 p.
9. Krotov V. F. *Osnovy optimalnogo upravleniya* [The basics of optimal management]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 430 p.
10. Masaev S. N. Dinamicheskoe uravnenie dlya upravleniya osoboy ekonomicheskoy zony subekta RF [Dynamic equation for managing the special economic zone of the subject of the Russian Federation]. *Uravneniya tipa svertki v nauke i tekhnologiyakh (ECTST-2019) : tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya Yu.I. Cherskogo* [Equation of Convolution Type in Science and Technology : All-Russian scientific and practical conference with international participation ECTST-2019 dedicated to the 90th Anniversary of the birth of Yuri Iosifovich Chersky]. Simferopol, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2019. P. 49–51.
11. Masaev S. N. *Metodika kompleksnoy otsenki upravlencheskikh resheniy v proizvodstvennykh sistemakh s primeneniem korrelyatsionnoy adaptometrii* [Methodology for the integrated assessment of managerial decisions in production systems using correlation adaptometry] Moscow, 2011.
12. Masaev S. N. Opredelenie gorizonta planirovaniya avtokorrelyatsionnoy funkciej v processe upravleniya predpriyatiem osoboy ekonomicheskoy zony [Determination of the planning horizon by an autocorrelation function in the process of managing an enterprise in a special economic zone]. *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem (TRIS-2019) : materialy konferentsii IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technologies of development of information systems (TDIS-2019) : Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference]. Taganrog, South Federal University, 2019. Vol. 1, pp. 52–59.
13. Masaev S. N. Otsenka upravleniya v kompanii metodom integralnykh pokazateley kompanii dlya shesti variantov ee razvitiya [Management assessment in the company by the method of integrated indicators of the company for six options for its development]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2013, vol. 2, pp 133–134.
14. Nemchinov V. S. Potrebitelnaya stoimost i potrebitelnye otsenki [Use value and use ratings]. *Ekonomiko-matematicheskie metody* [Economic and Mathematical Methods], 1963, vol. 1.

15. Novikov D. A. *Mekhanizmy funktsionirovaniya mnogourovnevnykh organizatsionnykh sistem* [Mechanisms for the functioning of multi-level organizational systems]. Moscow, Fond "Problemy upravleniya", 1999.
16. Aggarwal A. et al. *Special Economic Zones in South Asia: Industrial Islands or Vehicles for Diversification?* Washington, DC, International Trade Department, the World Bank, 2008.
17. Bai X. J., Yan W. K. & Chiu Y. H. Performance Evaluation of China's Hi-tech Zones in the Post Financial Crisis Era – Analysis Based on the Dynamic Network SBM Model. *China Econ. Rev.*, 2015, vol. 34, pp. 122–134.
18. Binazadeh T., Shafiei M. H., Bazregarzadeh E. New Approach in Guidance Law Design Based on Finite-Time Partial Stability Theorem. *Journal of Space Science and Technology*, 2015, vol. 8, pp. 1–7.
19. Bräutigam D. A. and Tang X. *Going Global in Groups: Structural Transformation and China's Special Economic Zones Overseas*. *World Development*, 2014, p. 63.
20. Chen H., Li B. Y., Zhang B. W., Zhang L. Global Finite-Time Partial Stabilization for a Class of Nonholonomic Mobile Robots Subject to Input Saturation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, vol. 12, no. 11, p. 159.
21. Chen J. *Social Cost-Benefit Analysis of China's Shenzhen Special Economic Zone*. *Development Policy Review* 11, 1993, no. 3, pp. 261–271.
22. *China Development Zones Association*. *China Development Zones Yearbook*. Beijing, China Financial & Economic Publishing House, 2011.
23. Farole Thomas. *Special Economic Zones in Africa: Comparing Performance and Learning from Global Experience*. Washington, DC, World Bank, 2011.
24. FIAS. *Special Economic Zones: Performance, Lessons Learned, and Implications for Zone Development*. Washington, DC: World Bank, 2008.
25. Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M. J. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 85, no. 1, pp. 87–96.
26. Haddad W. M., L'Afflitto A. Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, vol. 352, no. 6, pp. 2329–2357.
27. Jammazi C., Abichou A. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control. *Journal of Mathematical Control and Information*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 249–277.
28. Jenkins M., et al. Export Processing Zones in Latin America. *Harvard Institute for International Development. Development Discussion Paper*, 1998, no. 646 (August).
29. Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L. S. A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing. *International Journal of Production Research*, 2016, vol. 54 (23), pp. 7060–7073.
30. L'Afflitto A. Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control. *International Journal of Control*, 2017, vol. 90, no. 9, pp. 1861–1878.
31. Neveling P. *Free Trade Zones, Export Processing Zones, Special Economic Zones and Global Imperial Formations 200 BCE to 2015 CE*. *The Palgrave Encyclopedia of Imperialism and Antiimperialism*. Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2015.
32. Pavlov P. V., Vetkina A. V. Special economic zones as a key to sustainable economic development of Russia. *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS CIEDR 2018*. *Future Academy*, 2019, pp. 350–357.
33. Qrunfleh S., Tarafdar M. Supply chain management practices – IT utilisation alignment: Impact on supply chain performance and firm performance. *International Journal of Business Information Systems*, 2015, vol. 18 (4), pp. 364–389.
34. Bellman R. *Dynamic programming*. New Jersey, Princeton University Press, 1957.
35. Rahoof A. T. & Arul P. G. An Evaluation of Special Economic Zones (SEZs) Performance Post SEZs Act 2005. *Universal Journal of Industrial and Business Management*, 2016, no. 4 (2), pp. 44–52.
36. Rajpurohit T., Haddad W. M. Stochastic Finite-Time Partial Stability, Partial-State Stabilization, and Finite-Time Optimal Feedback Control. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2017, vol. 29, no. 2, p. 10.
37. Schminke A. & Biesebroeck J. Van. *Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China*, *Review of World Economics* (Weltwirtschaftliches Archiv). Springer, Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013, vol. 149 (2), pp. 343–367.
38. Wei L., Hong-Bo S., Zhe Z., Sang-Bing T., Yuming Z., Quan C. & Jiangtao W. The Development Evaluation of Economic Zones in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, no. 15 (56), pp. 1–14.
39. Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D. Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Proceedings of IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, issue 3, pp. 579–584.
40. Zhong R. Y., Xu C., Chen C., Huang G. Q. Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors. *International Journal of Production Research*, 2015, pp. 2610–2621.
41. Zohir S.C. *Gender balance in the EPZ: A socio-economic study of Dhaka export processing zone in Bangladesh*. Bangladesh Institute of Development Studies, 2001.

УДК 004+005.5+336.7+346.6

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
КОЛЛЕКТОРСКИХ АГЕНТСТВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Статья поступила в редакцию 15.11.2019, в окончательной варианте – 25.11.2019.

Врублевская Кира Александровна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, магистрант, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4725-0387>, РИНЦ AuthorID: 1046895, e-mail: vrublevskayakira@gmail.com

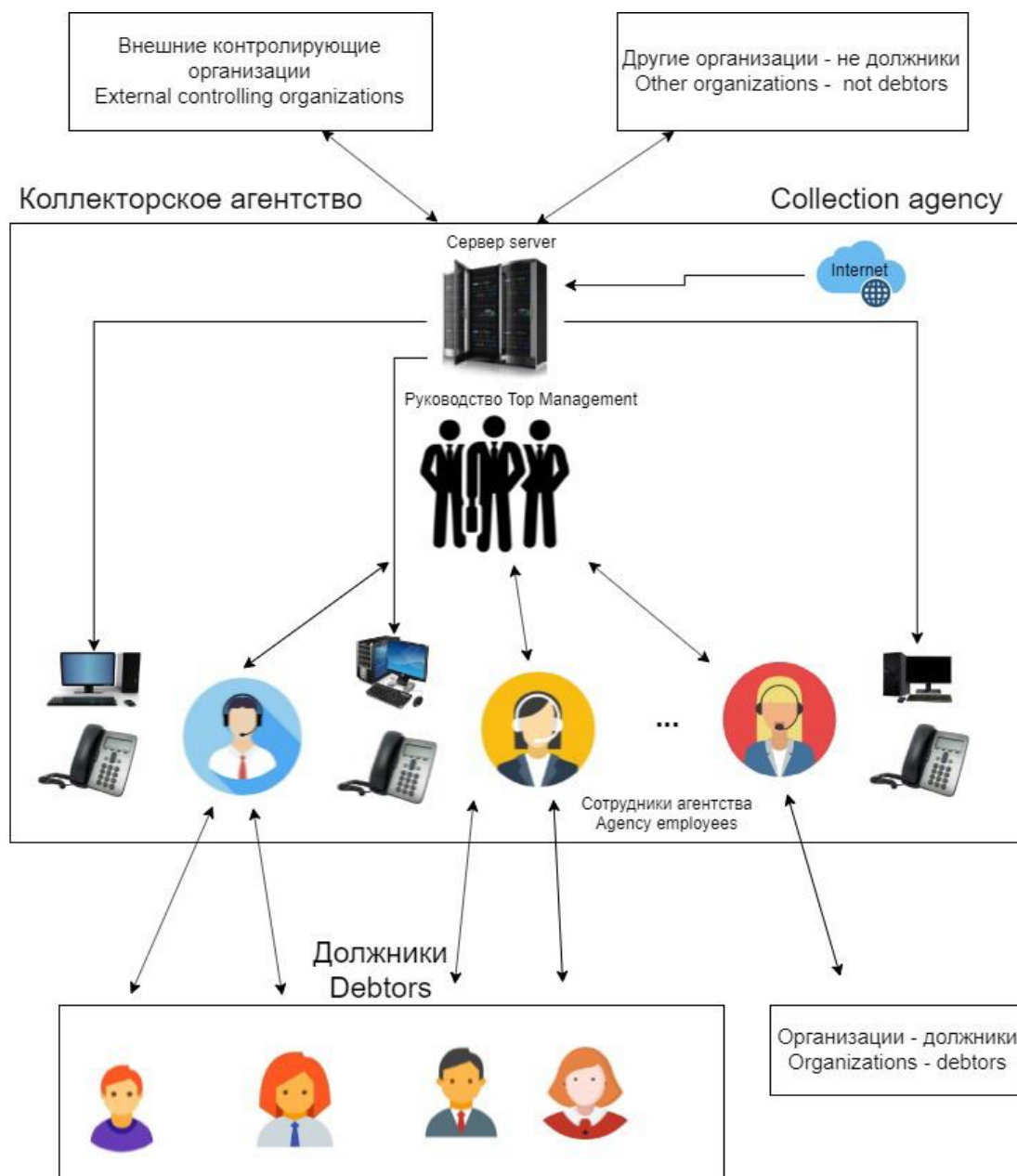
Брумитейн Юрий Моисеевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, кандидат технических наук, доцент, e-mail: brum2003@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0016-7295>, РИНЦ: AuthorID 280533

Мавлюдова Наиля Ильнуровна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, техник отдела кадров, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1787-0259>; РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=1042559, e-mail: mvnailya@mail.ru

Дан краткий обзор публикаций по теме статьи. Рассмотрены причины появления в России коллекторских агентств. Охарактеризованы юридические, информационные, кадровые, финансово-экономические условия деятельности коллекторских агентств с учетом факторов конкуренции и риска; ключевые направления взаимодействия коллекторских агентств с физическими и юридическими лицами; особенности принятия оперативных и долгосрочных решений, связанных с управлением коллекторских агентств. Описаны основные направления использования информационно-телекоммуникационных технологий в деятельности коллекторских агентств, включая сбор необходимой информации, в том числе в рамках «конкурентной разведки»; обеспечение взаимодействия коллекторских агентств с внешней средой (организациями и физическими лицами); информационно-технологическая поддержка процессов управления работой коллекторских агентств, в том числе оценка качества работы и управление персоналом; оценка (прогнозирование) опасности различных видов угроз для коллекторских агентств; уменьшение вероятностей их реализации; снижение ущерба в случаях реализации этих угроз. Дан краткий обзор программных средств, разработанных/используемых для обеспечения деятельности коллекторских агентств по различным направлениям работы, включая следующие: контроль качества и результативности работы персонала коллекторских агентств, учет фактов информационного взаимодействия коллекторских агентств с должниками, обеспечение информационной безопасности коллекторских агентств и пр. Проанализирована совокупность источников угроз и структура рисков деятельности коллекторских агентств с учетом особенностей работы персонала, направлений применения информационно-телекоммуникационных технологий, факторов конкуренции между коллекторскими агентствами. Отдельное внимание уделено работе «антиколлекторских агентств». Обосновано, что различные виды угроз (включая угрозы информационной, кадровой и физической безопасности) в конечном счете влияют на экономическую безопасность работы коллекторских агентств. Исследованы возможности и ограничения по управлению рисками деятельности коллекторских агентств. Показано, что соответствующие решения принимаются в условиях неполноты и неточности информации, в том числе в отношении результатов реализации принимаемых решений. Приведены математические модели для оценки/прогнозирования экономической эффективности деятельности коллекторских агентств, учитывающие возможности использования различных подходов к взаимодействию с банками и должниками.

Ключевые слова: коллекторские агентства, информационно-телекоммуникационные технологии, экономическая безопасность, информационная безопасность, кадровая безопасность, структура угроз, анализ рисков, риск-менеджмент, принятие решений, нечеткие условия, модели прогнозирования рентабельности

Графическая аннотация (Graphical annotation)



**METHODS AND MODELS OF COLLECTION AGENCY RISK MANAGEMENT
IN CONDITIONS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION
TECHNOLOGIES DEVELOPMENT**

The article was received by the editorial board 15.11.2019, in the final version – 25.11.2019.

Vrublevskaya Kira A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, undergraduate student, e-mail: vrublevskayakira@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4725-0387>, RISC: AuthorID: 1046895

Brumshteyn Yuriy M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0016-7295>, RISC: AuthorID 280533, e-mail: brum2003@mail.ru

Mavlyudova Nailya I., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

technician of personal department, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1787-0259>; РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=1042559, e-mail: mvnailya@mail.ru

The paper presents a brief overview of publications on the article topic and considers some reasons for collection agencies (CA) emergence in Russia. It describes the conditions of CA activity (legal, information, personnel, financial and economic) with regard to the factors of competition and risks; key areas of interaction between CA, natural and legal persons; peculiarities of making operational and long-term decisions, related to CA management. The authors describe the main areas of applying information and telecommunication technologies (ITCT) in CA activities, including collection of necessary information, i.a. within the framework of "competitive exploration"; ensuring interaction of CA with the external environment (organizations and physical entities); information technology support for control over CA processes, including performance assessment and personnel management; evaluation (forecasting) of various types of threats to CA; reducing probability of their implementation; mitigation of damages in cases of these threats realization. There is a brief overview of software tools developed/used to support CA activities in various areas of work like quality control and performance control of CA personnel, consideration of cases of CA information interaction with debtors, ensuring CA information safety, etc. A set of threat sources and risk structure of CA activity was analyzed with regard to the peculiarities of personnel work, areas of ITCT application, factors of competition between various CA. Special attention is paid to the work of "anti-collection agencies." It is justified that various types of threats (including threats to information, personnel and physical security) ultimately affect the economic security of CA activities. Capabilities and limitations for CA risk management were investigated. It is shown that relevant decisions are made in terms of incomplete and inaccurate information, i.a. in relation to the decision analysis results. Mathematical models for estimation/forecasting of CA economic efficiency are presented, taking into account possibilities of using various approaches in their interaction with banks and debtors.

Key words: collection agencies, information and telecommunication technologies, economic security, information security, personnel security, threat structure, risk analysis, risk management, decision-making, unclear conditions, models of profitability forecasting

Введение. После перехода к рыночной экономике в России значительно изменился характер финансово-экономических процессов, структура рисков для организаций [5, с. 9], отдельных физических лиц (ФЛ), семей. В частности, большую роль в «финансовой обстановке» в стране и регионах начали играть коммерческие банки, осуществляющие кредитование юридических лиц и населения. При этом возникла и проблема «невозврата долгов ФЛ». Одним из вариантов решения этой проблемы стало создание коллекторских агентств (КА). В настоящее время КА играют заметную роль в социально-экономических процессах, протекающих в регионах России и стране в целом; оказывают влияние на значительные контингенты ФЛ, имеющих просроченные задолженности по кредитам, а также на рентабельность работы кредитно-финансовых организаций (КФО), их экономическую устойчивость в условиях рыночной экономики. Как следствие, в научной периодике публикуется значительное количество статей, посвященных деятельности КА. Однако среди них нет работ, специально посвященных вопросам безопасности деятельности КА в условиях широкого использования информационно-телекоммуникационных технологий (ИТКТ). Поэтому цель данной статьи – комплексный анализ вопросов безопасности деятельности КА с учетом возможностей и угроз, которые несет использование ИТКТ. При этом нормативно-юридические аспекты деятельности КА затрагиваются лишь в минимальном объеме, так как эту тематику предполагается рассмотреть в другой работе.

Краткий обзор публикаций, посвященных различным аспектам деятельности коллекторских агентств. На ресурсе www.elibrary.ru 23.11.2019 по запросу «Коллекторские агентства» (только по названиям, аннотациям и ключевым словам) было выявлено 389 публикаций, однако, по крайней мере, один источник был нерелевантен запросу.

Отметим прежде всего, что значительная часть имеющихся публикаций посвящена вопросам нормативно-правового регулирования деятельности КА и в силу этого они имеют похожие названия [4, 14, 27]. При этом необходимо учитывать устаревание опубликованных работ в связи с изменением законодательства о КА [17], банкротстве [16] и банковской деятельности [15]. Поэтому ниже рассматриваются в основном только относительно «свежие» публикации.

Как и следовало ожидать, основная часть русскоязычных работ посвящена условиям деятельности КА в России. Однако есть несколько публикаций, посвященных деятельности КА за рубежом [12, 20], в том числе в Республике Казахстан [3]. При этом отмечается, что в зарубежной практике (так же как и в России) встречаются случаи использования КА «незаконных тактик» при работе с должниками [11]. В связи с этим отметим обсуждение вопросов, связанных с «давност-

ными сроками» привлечения КА (как юридических лиц) к административной ответственности за нарушения федерального законодательства [8].

В основном в российской периодике рассматриваются вопросы взаимодействия КА с банками [22]. Однако есть и статьи, посвященные взаимодействию КА с микрофинансовыми организациями [1], со службами судебных приставов [21] и др.

Отмечается, что КА могут работать с долгами не только ФЛ, но и организаций [26]. При этом возможности «информационного воздействия» на юридических лиц у КА больше, так как могут применяться дополнительные методы, включая размещение в интернете информации, наносящей «репутационный ущерб» организациям-должникам [26]. В этой работе также подчеркивается, что для «дистанционных контактов» с должниками и «очных» встреч с ними КА могут использовать разных людей, обладающих различными «стилями» поведения, общения с должниками.

Важное значение в деятельности КА имеет работа с собственным персоналом, включая обеспечение его лояльности, адекватной мотивации деятельности, снижение текучести и пр. Однако этим вопросам в существующей литературе уделяется значительно меньшее внимание. Между тем, как показано в [2], именно «человеческий фактор» может быть слабым звеном в обеспечении информационной безопасности организаций.

На безопасность деятельности КА потенциально может влиять и расположение используемых ими помещений, зданий [6]. При этом неудобное (с точки зрения персонала) расположение помещений/зданий может приводить к увеличению текучести кадров.

Особо отметим работу [24], в которой рассматриваются некоторые технические вопросы подключения КА к сетям операторов сотовой связи.

В отношении учета КА, работающих в России, укажем статью [10], в которой проанализированы «сложности» ведения реестра таких организаций на федеральном уровне.

В базе данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС) за последние годы зарегистрировано достаточно много «программ для ЭВМ», связанных с информационно-технической поддержкой деятельности КА (см. сайт www1.fips.ru). Анализ имеющихся кратких рефератов к таким программам показал, что они ориентированы главным образом на поддержку работы КА с должниками, а функциональность разработок по направлениям работы КА с собственным персоналом (включая оценки эффективности его деятельности) является недостаточной. Отметим, что в литературных публикациях, рассмотренных выше, ссылки на конкретные «программы для ЭВМ», как правило, отсутствуют. Таким образом, «массивы» научных публикаций по тематике деятельности КА и программных разработок для их поддержки являются слабо связанными.

Общая характеристика условий и практики деятельности коллекторских агентств. С 2003 по 2006 г. в России наблюдался резкий скачок потребительского кредитования населения банками. В этот период, по данным Банка России, размер задолженностей по кредитам увеличился в двадцать раз. При этом резко выросло и количество/объемы «невозвращенных кредитов». В свою очередь это повлияло на «экономическую устойчивость» работы банков, возможности снижения ими ставок по кредитам для населения и, как следствие, на их конкурентоспособность на рынке услуг кредитования. Указанная проблема для кредитно-финансовой сферы России носила «системный» характер, и для ее решения использовались различные методы, включая создание «коллекторских подразделений» в составе банков. Однако коллекторская деятельность для банков и микрофинансовых организаций (МФО) является нехарактерной, требует использования специального персонала с иными навыками и приемами работы, особых технологий организации его деятельности и пр. Эти причины привели к возникновению юридически самостоятельных КА, автономных по отношению к КФО. Первое из них в России появилось в 2004 г. – это было закрытое акционерное общество «ФАСП» (оно было зарегистрировано 9 августа 2004 г. в г. Москве).

В настоящее время, судя по данным на интернет-странице <https://www.napca.ru/press-tsentr/analitika/detail.php?ID=9827> на 03.09.2019, в России «просроченными кредитами со сроком больше 90 дней являются 13–14 млн ссуд», причем «данный показатель постоянно увеличивается», а «суммарная просроченная задолженность физических лиц перед банками на текущий момент превышает 771 млрд руб.». При этом «8 из 10 должников, имеющих просроченную задолженность свыше 90 дней, удается закрыть обязательства в течение 1,5–2 лет после того, как они начинают активно работать со своей просрочкой». Отметим, что во многих случаях банкам удается самостоятельно добиться начала погашения задолженности заемщиками за счет изменения условий возврата долгов: объявления на определенное время «каникул» по выплатам задолженностей; «растягивания» выплат на более длительные сроки, что уменьшает «финансовую нагрузку» на клиентов и пр.

Условия деятельности КА в общем случае могут рассматриваться по различным направлениям: финансово-экономическим, нормативно-юридическим, информационным, кадровым и т.д. При этом необходимо учитывать следующее: тесные взаимосвязи этих направлений друг с другом; влияние факторов конкуренции между КА и рисков их деятельности.

Основной целью деятельности КА, как, впрочем, и любых других коммерческих организаций, является «*извлечение коммерческой прибыли*». При этом для получения прибыли КА оказывают «финансовые услуги» КФО по просроченным кредитам. Теоретически возможна «передача» КА долгов и «кредитными кооперативами». Однако по 190-ФЗ от 18.07.2019 г. «О кредитной кооперации» для таких кооперативов возможности «передачи задолженностей» в явной форме не предусмотрены. В литературе встречаются упоминания и о работе КА с задолженностями ФЛ и перед другими типами организаций, включая страховые фирмы и организации, собирающие платежи за коммунальное обслуживание. Укажем две основные «технологии» работы КА с КФО в отношении работы по задолженностям.

1. Банк или МФО заключают «агентский договор» (АД), соответствующий ст. 1005 Гражданского кодекса (ГК) РФ – от 30 ноября 1994 г. № 51-ФЗ (ред. 18.07.2019). При этом КА в соответствии с АД является представителем интересов банка или МФО, действует от их имени, получает некоторый процент от возвращенных сумм (однако долг заемщика остается долгом той организации, которая выдала кредит). Таким образом, КА выступает посредником между банком (или МФО) и должником. В большинстве банковских договоров кредитования прописано, что банк имеет право передавать свои права кредитора третьему лицу. Подписывая договор, заемщик соглашается с этим условием. Передача долга коллекторам незаконна лишь в том случае, если запрет на это был прямо оговорен в договоре кредитования (на практике это имеет место достаточно редко).

В рамках исполнения договора КА может осуществлять «работу» с должником по разным направлениям: телефонные звонки, личные встречи, отправки SMS-сообщений и пр. Крайняя мера – передача КА дела в суд по поручению банка или МФО. В случае взыскания долга по решению суда (с использованием деятельности «судебных исполнителей») полученные средства, в том числе и в результате принудительной продажи имущества должника, будут перечислены на счет организации-кредитодателя – банка или МФО. Последнюю часть этих средств (в зависимости от условий АД) передают КА.

Основные преимущества этого варианта для КА: расходы осуществляются только на деятельность самой фирмы, но не на «покупку» долгов у организации-заемщика; как следствие – экономические риски, связанные с «невозвратом» долгов заемщиками, для КА меньше. Основные недостатки варианта: хотя всю работу с должником проводит КА, оно получает лишь часть возвращенных средств.

2. Организация, выдавшая кредит, продает КА все права на долговые обязательства заемщика. На практике, судя по информации в интернете [25, с. 1], крупные банки стремятся продавать долги большими «пакетами» за несколько процентов от суммы задолженностей. При этом по [10, с. 2] в мировой практике «очень хорошим результатом» считается «*продажа банком проблемных потребительских кредитов за 6,5 % от суммы долгов в пакете*». В то же время в России ранее долги заемщиков нередко продавались за 10–12 %, что затем вызывало значительные проблемы в работе КА [10, с. 2].

Достоинства этого варианта для КА: наличие прав юридической собственности на долги обеспечивает более широкие возможности работы с заемщиками (без участия банка или МФО); все полученные суммы поступают на счет КА. Недостатки: в покупку долгов КА вкладывают средства, которые для них фактически являются «оборотными»; риски деятельности, связанные с «невозвратом» долгов заемщиками, целиком «ложатся» на КА.

На практике КА в своей деятельности могут комбинировать обе технологии, в том числе использовать разные варианты для взаимодействия с разными банками и МФО. Таким образом, они фактически осуществляют управление рисками своей экономической деятельности в условиях неопределенности [9, с. 9].

Случаи «перепродажи» одними КА долгов другим КА на практике пока, видимо, редки, так как агентства активно конкурируют друг с другом. Однако упоминания о таких предложениях в интернете встречаются.

Основные технологические особенности деятельности КА: 1. Короткие «цепочки» финансовых операций, осуществляемых банками или МФО в рамках кредитной деятельности: «предоставление займов, возврат долгов» или «предоставление займов – передача долгов КА – получение средств от КА». 2. Высокая доля используемой конфиденциальной информации, разглашение которой может нанести вред самим КА; заемщикам; банкам или МФО, предоставившим кредиты.

3. Высокий уровень рисков деятельности КА, в том числе связанных с «человеческим фактором» – прежде всего их собственным персоналом. 4. Ограниченные возможности автоматизации основных технологических процессов в КА и, как следствие, высокая трудоемкость работ, связанных с возвратом задолженностей. 5. При нарушениях сотрудниками КА должностных обязанностей, требований информационной безопасности и пр. для агентств возможны значительные объемы потерь – финансово-экономических, неимущественных (утрата деловой репутации) и пр.

Представим основные юридические документы, связанные с регламентацией деятельности КА и связанных с ними организаций.

Для темы статьи наиболее важен Федеральный закон «О защите прав и законных интересов физических лиц при осуществлении деятельности по возврату просроченной задолженности и о внесении изменений в Федеральный закон «О микрофинансовой деятельности и микрофинансовых организациях» [17] (далее – Закон). С момента вступления его в силу (01.01.2017) банки и МФО имеют право передавать информацию о должниках только КА, которые зарегистрированы в государственном реестре юридических лиц, осуществляющих деятельность по возврату просроченной задолженности в качестве основного вида деятельности (ст. 4, пункт 1, подп. 2; ст. 12). Также этот Закон определил полномочия и запреты в отношении деятельности КА на территории РФ. 1. Согласно ст. 4 Закона, работники КА могут встречаться с должником, писать, звонить ему, отправлять голосовые сообщения, почтовые уведомления только с момента образования просрочки по уплате долга. С письменного согласия должника работники КА имеют право общаться с родственниками должника. 2. Работник КА при взаимодействии с должником обязан сообщить свою фамилию, имя, отчество, наименование КА или ее регистрационный номер. 3. Контакты с должником от имени КА могут осуществляться в рабочие дни (с 8.00 до 22.00) и в выходные (с 9.00 до 20.00) – по ст. 7, п. 3, подп. 1. 4. Личные (очные) встречи с должником должны происходить не чаще одного раза в неделю – по ст. 7, п. 3, подп. 2 Закона. 5. Количество звонков со стороны КА на личный, рабочий номера должника ограничены: не более одного раза в течение дня, двух – в неделю, восьми – в месяц (ст. 7, п. 3, подп. 3). Отметим, впрочем, что пользователи мобильных устройств могут использовать личные «черные списки» номеров телефонов, звонки с которых автоматически блокируются с использованием «сервисов», предоставляемых некоторыми операторами сотовой связи. 5. Законом ограничена также отправка «телеграфных сообщений, текстовых, голосовых и иных сообщений, передаваемых по сетям электросвязи, в том числе подвижной радиотелефонной связи» со стороны КА: не более 2-х раз за сутки, 4-х – в неделю и 16 – за месяц (ст. 7, п. 5, подп. 2).

Основания для КА прекращения попыток получения долга от заемщика (по ст. 7 Закона) следующие: банкротство ФЛ, признанное судом обоснованным; должник является недееспособным и имеет подтверждающие это документы.

По теме данной статьи отметим также следующие законы. 1. *О несостоятельности (банкротстве)*» [16] – важна прежде всего глава X. *Банкротство гражданина*. 2. *О банках и банковской деятельности* [15]. Для темы работы важны ст. 26 «Банковская тайна», ст. 33 «Обеспечение возвратности кредитов», ст. 34 – «Объявление должников несостоятельными (банкротами) и погашение задолженности». 3. *О микрофинансовой деятельности и микрофинансовых организациях* [18] – прежде всего ст. 9 «Права и обязанности микрофинансовой организации». 4. *О персональных данных* [19] – по теме статьи наиболее важна ст. 19 «Меры по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке» и ст. 24 «Ответственность за нарушение требований настоящего Федерального закона». 5. Трудовой Кодекс РФ [23] – прежде всего ст. 57, 58, 70. Некоторые виды нарушений правил работы сотрудников КА, а также действия заемщиков, могут соответствовать также отдельным статьям «Кодекса об Административных правонарушениях РФ» (от 30.12.2001 № 195-ФЗ, ред. от 02.08.2019) и Уголовного кодекса РФ (от 13.06.1996 № 63-ФЗ, ред. от 02.08.2019).

В отношении «работы по кредитам» важны «бюро кредитных историй» – их деятельность осуществляется на основании ФЗ № 218 от 30.12.2004 «О кредитных историях». Однако «информационное взаимодействие» с такими бюро непосредственно в законодательстве предусмотрено лишь для банков (по [15], ст. 30) и МФО (по [13], ст. 16), но не для КА.

Отметим также деятельность организации «Национальная ассоциация профессиональных коллекторских агентств» (далее – НАПКА). Она была создана в 2007 г.; объединяет 40 КА; проводит различные мероприятия, включая конференции; не является «саморегулирующей организацией». Сайт НАПКА – «<https://www.napca.ru/>» публикует различные материалы, в том числе аналитические и учебные, для повышения финансовой грамотности ФЛ.

Основные направления использования информационно-телекоммуникационных технологий в деятельности коллекторских агентств. В качестве таких направлений укажем следующие:

1. Сбор необходимой оперативной информации, по крайней мере, по следующим направлениям: а) о деятельности КА-конкурентов, в том числе в рамках «конкурентной разведки»; б) о должниках – физических и юридических лицах, включая сведения, характеризующие их платежеспособность. 2. Обеспечение информационного взаимодействия КА с внешней для них средой, включая различные организации и ФЛ. Это касается, прежде всего, использования ИТКТ для передачи и приема различных сообщений, в том числе оперативного характера. 3. Информационно-технологическая поддержка процессов управления работой КА. При этом целесообразно различать оперативное управление и долговременное, а также следующие направления: а) информационная поддержка финансово-экономических операций КА; б) поддержка внутреннего документооборота; в) накопление необходимой информации для оценки качества работы персонала, проведение оценок результативности его работы; г) собственно управление персоналом, включая планирование и реализацию различных видов действий в отношении определенных сотрудников; д) оценка (прогнозирование) опасности различных видов угроз для КА; е) поддержка принятия решений по уменьшению вероятностей их реализации, снижению ущербов в случаях реализации этих угроз; ж) обеспечение информационной, криминальной и физической безопасности работы КА.

Программно-технические средства, используемые в КА, можно разделить на две большие группы.

Программные средства общего назначения, которые не специфичны для КА. 1. Офисные пакеты – чаще всего это MsOffice. В них в основном используются: а) текстовые редакторы: для создания документов (включая организационно-распорядительные) и их распечатки, формирования различных план-графиков и пр.; б) электронные таблицы – для ведения списков, различного рода расчетов и др. «Утечки» из КА некоторых видов таких документов, в том числе в электронной форме, могут представлять прямую угрозу для их информационной безопасности (ИБ) и экономической безопасности. 2. Средства электронной почты (ЭП). Обычно в КА применяются наиболее популярные в России порталы ЭП, реже – корпоративные системы ЭП. 3. Программные средства (ПС) фирмы «1С», предназначенные для решения бизнес-задач. 4. Реже в КА используются ПС для контроля/управления внутренним документооборотом. 5. ПС для учета входящей и исходящей корреспонденции КА. 6. Могут также применяться специализированные ПС для «управления качеством» деятельности КА, контроля «исполнения поручений» сотрудниками и пр. 7. Большинство необходимых для деятельности КА нормативно-юридических документов могут быть найдены в интернете, скачаны и накоплены для последующего использования. Однако применение устанавливаемых на сервера КА юридических информационно-справочных систем (Консультант Плюс, Гарант и пр.) обеспечивает существенные преимущества: систематическое обновление баз данных (БД) таких информационно-справочных систем (ИСС); возможности работы с версиями документов за различные даты; расширенные возможности поиска документов «смежной тематики», переходов на них по гиперссылкам и пр. Поэтому «покупные» юридические ИСС обычно используются в КА.

Нагрузка на «отделы кадров» в КА может быть достаточно высокой по следующим причинам: значительное количество сотрудников, осуществляющих контакты с должниками (операторы колл-центров); высокий «уровень текучести» таких сотрудников и, как следствие, необходимость внесения в БД сведений об увольняющихся лицах, о приеме новых сотрудников, составления большого количества трудовых договоров с ними и пр. При этом трудоемкость указанных работ обычно снижается за счет использования шаблонов часто применяемых документов.

На минимальном уровне основные потребности КА в ведении БД должников, учету проводимых с ними действий и пр. могут быть обеспечены с использованием электронных таблиц. Для расширения функциональности разработок в таких таблицах могут быть применены некоторые макросы. Однако на практике для работы с указанными БД применяются специализированные разработки.

Разработка и ведение **сайтов КА** может осуществляться как их собственными специалистами, так и другими организациями (в порядке аутсорсинга). При этом для КА всероссийского характера обычно применяется общий сайт с возможностями переходов по гиперссылкам на сайты региональных подразделений агентств.

Мониторинг «известности» и «информационной репутации» КА в интернет-пространстве может осуществляться с использованием поисковых систем интернета (Yandex, Google и пр.). Возможные риски для КА по этому направлению: 1. Если для названий КА используются широко распространенные словосочетания, то поисковые системы интернета могут выдавать ссылки и на другие организации. Поэтому результаты поисковых выдач будут слабо релевантны запросам. 2. Появление резко отрицательных и/или тенденциозных отзывов о КА тех ФЛ, с которыми они работают или работали. В размещении таких отзывов часто заинтересованы не только сами долж-

ники, но и «антиколлекторские агентства» (АКА). При этом АКА могут представлять свои сайты для размещения «благодарственных» отзывов о своей деятельности в сочетании с негативными отзывами в отношении КА. Однако большинство ФЛ, пользующихся услугами АКА, не заинтересованы в том, чтобы их фамилии фигурировали в интернете в связи с выплатой задолженностей. Поэтому в таких отзывах могут приводиться только имена и первые буквы фамилий клиентов АКА. 3. «Фейковые» (специально придуманные) негативные отзывы о КА, предназначенные для оказания на них «информационного» (морального) давления.

Специализированные программные разработки для коллекторских агентств. Анализ ПС, зарегистрированных на сайте ФИПСа, по запросу «коллекторские агентства» за период с 2013 г. позволил обнаружить 19 «программ для ЭВМ», в названиях или в рефератах, к которым имеется указанное словосочетание (зарегистрированных «баз данных» по указанному словосочетанию на этом ресурсе обнаружено не было). Еще 4 «программы для ЭВМ» обнаруживаются по запросу «коллекторская деятельность». Отметим следующее: 1. В ФИПСе регистрируется, очевидно, лишь небольшая доля разработанных и эксплуатируемых ПС, предназначенных для КА. При этом распространение сведений о ПС, используемых в конкретных организациях (и особенно о функциональности этих ПС), может представлять угрозу для ИБ КА. 2. Зарегистрированные в ФИПСе ПС можно отнести к двум основным классам: 2а) функционально специализированные модули; 2б) ПС комплексного характера, в том числе обеспечивающие автоматическое взаимодействие с колл-центрами, регистрацию входящих и исходящих звонков; учет поступления средств от должников и пр. Однако в отношении работы с персоналом КА эти разработки обычно имеют достаточно ограниченные возможности. Постоянное подключение таких ПС к интернет-ресурсам (в том числе к сайтам КА) обычно увеличивает уровни угроз ИБ. 3. Разработки фирмы «1С»: «1С Предприятие»; «1С Бухгалтерия» – сейчас это собирательное название «бухгалтерских продуктов»; «1С-ЗУП» – конфигурация «зарплата и управление персоналом». В «корпоративной версии» этот продукт содержит, в частности, модули «Подбор персонала», «Кадровое планирование», «Обучение и контроль персонала» и иные. Отметим, что на сайте фирмы «1С» (v8.1.ru/hrm) среди «отраслевых решений» не представлены специальные «конфигурации» для КА. Однако они почти наверняка есть у многочисленных франчайзи этой фирмы в России. 4. Как пример одного из специализированных ПС, достаточно широко используемых в деятельности КА России, отметим разработку Коллекторская система «Контакт» от фирмы Luxbase (<http://www.luxbase.ru>). Она, в частности, автоматизирует процесс взыскания долгов, информирует операторов КА о приближающихся сроках платежей по кредитам и пр.

Основные направления работы с персоналом КА и программные средства для их поддержки. Экономическая безопасность деятельности КА наряду с другими факторами определяется наличием достаточного количества квалифицированного персонала, результативностью его работы. В соответствии с ТК РФ наем персонала в КА может производиться по договорам, заключенным на «неопределенный срок» (ст. 58 ТК РФ) или «срочных» трудовых договоров (ст. 58, 59 ТК РФ). Для уменьшения рисков КА новые сотрудники могут приниматься на работу с «испытательным сроком», который по ТК РФ (ст. 70) для большинства типов должностей не может превышать трех месяцев. Принимаемые на работу в КА сотрудники кроме договора найма подписывают и ряд других документов (или соответствующие требования включаются в сами договоры в качестве «дополнительных условий» – по ст. 57 ТК). В типичных случаях это обязательства «о неразглашении служебной информации», включая «персональные данные» [19] сотрудников и должников; документы, запрещающие использование сотрудниками КА служебной информации в любых «неслужебных» целях; обязательства по соблюдению должностных инструкций (регламентов) – в большинстве КА их достаточно много, и они часто пополняются.

Наиболее массовая должность в КА – операторы колл-центров. За один рабочий день они обычно проводят одну-две сотни телефонных бесед (переговоров) с должниками. Цели таких бесед: разобраться в каждой конкретной ситуации; предложить должнику подходящий план действий; в некоторых случаях – оказать «моральное» или «информационное» давление» на должника в пределах, установленных действующим законодательством. Современные ИТКТ потенциально позволяют проводить беседы и в режиме видеоконференц-связи (например, через Skype), однако в КА это обычно не применяется.

Основные трудности при работе с персоналом КА: 1. Достаточно «нервный» характер деятельности операторов колл-центров. Как следствие, сотрудники КА иногда могут неэтично вести переговоры с клиентами, обращаться с коллегами по работе, допускать «инсайдерские» утечки информации – в том числе и неумышленные и пр. 2. Относительно невысокие зарплаты и уровни премий, которые в большинстве случаев зависят от сумм, возвращенных должниками, но не от фактических объемов работы, проделанной сотрудниками КА. 3. Ограниченные возможности по-

вышения «деловой квалификации» и карьерного роста для сотрудников КА. 4. Достаточно «жесткое» регулирование возможностей (допустимых средств) работы с должниками, предусмотренное федеральным законодательством (см. выше). 5. Большое количество не только федеральных законов, но и внутренних правил, регламентов и инструкций, которые необходимо знать и выполнять сотрудникам КА. 6. Значительные объемы «персональных данных» клиентов, с которыми работают сотрудники КА. Однако в рамках использования в КА ИСС по должникам каждому сотруднику может назначаться ограниченный список должников, при этом он будет иметь доступ только к их персональным данным.

Следствия указанных трудностей: А. Снижение долговременной мотивации деятельности большинства сотрудников КА и высокая текучесть персонала. Это влияет и на ИБ деятельности КА и, в результате, на их экономическую безопасность. Возможные причины снижения уровня ИБ: утечки информации, связанные с увольняющимися сотрудниками; приход новых сотрудников, обладающих недостаточной квалификацией (навыками), в том числе в области использования ИТКТ и соблюдения правил ИБ. Б. Значительная нагрузка на сотрудников КА может приводить к неполному и/или некачественному выполнению ими служебных обязанностей, поиску ими иных мест работы и пр. Такие факты обычно рассматриваются как «снижение лояльности персонала» по отношению к работодателю.

Рядом российских фирм предлагаются услуги по комплексному мониторингу «информационной активности» персонала организаций (прежде всего в интернет-пространстве, и в частности в социальных сетях, на сайтах типа «Ищу работу» и пр.). Однако такие услуги весьма дорогостоящие. Поэтому для КА необходим внутренний контроль/управление работой сотрудников, в том числе в профилактических целях. Укажем возможные направления (средства) использования ИТКТ для этих целей.

1. Планирование распределения (и при необходимости перераспределения) должников между сотрудниками КА для «выравнивания» их нагрузки, повышения результативности деятельности. 2. Разработка планов информационных контактов сотрудников КА с должниками, оперативный контроль соблюдения этих планов. 3. Прослушивание ранее записанных телефонных переговоров сотрудников КА с должниками – такая запись представляет одно из направлений обязательной «документальной фиксации» всех информационных контактов КА с должниками. Возможные варианты прослушивания: выборочно – в плановом порядке; после поступления жалобы на действия конкретных сотрудников КА, допущенные ими грубость, нетактичное поведение и пр.; в рамках более тщательного контроля тех лиц, к которым имеются систематические претензии по работе, а также вновь поступивших сотрудников. Отметим, что современные ИТКТ, применяемые в колл-центрах, предупреждают должников, с которыми ведутся телефонные переговоры, о том, что «Ваш разговор может быть записан». Прослушивание звукозаписей обычно осуществляет специально выделенный сотрудник (в крупных КА – группа сотрудников). Основные цели анализа переговоров – выявление фактов нарушения персоналом этических норм и/или неквалифицированного проведения переговоров. «Ручной» анализ переговоров – эффективное, но весьма трудоемкое средство. Поэтому в некоторых крупных КА используются ПС автоматизированного анализа записанных переговоров (методы анализа речи). Такие разработки предлагаются, в частности, российской компанией «Центр речевых технологий» (<https://www.speechpro.ru>), израильской – Nice Systems (www.nice.com), американской Verint – сайт <https://ru.verint.com/index.html>. Также укажем, что использование ИТКТ позволяет создавать «диалоговые тренинговые системы ведения бесед с должниками» для обеспечения необходимых навыков сотрудников КА, в том числе вновь принятых на работу. 4. Анализ «активности» (действий) сотрудников КА в отношении работы с должниками: звонков, отправок SMS-сообщений, отправка писем по ЭП, личных встреч с должниками. Отметим, что должники могут внести адреса ЭП отправителей писем из КА в «черные списки» (соответствующие спаму) и тогда сообщения до должников не будут доходить – по крайней мере в основном массиве поступающих писем.

В автоматическом режиме на основе анализа БД в ИСС КА за определенные периоды времени может быть выявлено следующее. 1. Отсутствие активности (действий) сотрудников в отношении конкретных должников за определенный период времени. 2. Низкий уровень такой активности, не отвечающий плановым показателям. 3. Неравномерное распределение «фактов активности» по времени. 4. Нарушение сотрудниками КА существующих нормативных ограничений по количеству действий в отношении должников за сутки, неделю, месяц [17]. 5. Анализ «результативности» работы отдельных сотрудников КА и/или подразделений в отношении возврата сумм должниками, в том числе за определенные периоды времени. 6. Анализ случаев нарушений сотрудниками КА норм ИБ и установленных регламентов при работе на служебных ПЭВМ. 6а. По-

пытки посещения сайтов, не связанных со служебной деятельностью, в том числе использования сайтов «социальных сетей» в рабочее время и пр. При использовании в КА прокси-серверов такие нарушения могут быть минимизированы за счет использования «масок доступа» к сайтам, предотвращающих переходы на нежелательные интернет-ресурсы. бб. Работа со средствами ЭП в личных целях. бв. Использование сотрудниками личных флэш-накопителей для записи, хранения, считывания служебной информации КА – при этом возможны несанкционированные утечки информации, «занесения» на служебные ПЭВМ вредоносных программ и пр. 7. Учет и анализ фактов проведения руководством КА бесед с сотрудниками, в том числе о необходимости соблюдения этических норм общения, правил ИБ и пр. 8. Учет и анализ обращений должников (а также по их поручениям иных физических и юридических лиц) с жалобами на действия сотрудников КА; состава мер, принятых в КА по результатам этих обращений; оценки результативности этих мер.

Применение ИТКТ для поддержки звонков должникам, учета и анализа содержания таких звонков. Использование автоматизированных систем телефонии (АСТ) может значительно повышать производительность труда операторов колл-центров КА. В рамках АСТ могут применяться, в частности, цифровые офисные АТС – это позволяет уменьшить количество входящих телефонных линий; использовать средства IP-телефонии и пр.

Наиболее популярные у КА системы телефонии поставляют следующие фирмы: американская Avaya (www.avaya.com), российские «ИнтелТелеком» (Infinity) – сайт <https://www.inteltelecom.ru>, «Аксиоматика» (<https://axiomatika.ru>). Также достаточно известны продукты на базе свободно распространяемых ПС Asterisk (<http://asterisk.ru>).

Существенно, что АСТ могут интегрироваться с комплексными ИСС КА и обеспечивать автоматизированный учет входящих и исходящих звонков в БД, включая номера, на которые (или с которых) осуществлялись звонки, продолжительности переговоров с должниками и пр.

Одним из ключевых «модулей» в АСТ являются системы автоматизированного автобзона (автодайлеры). Благодаря им, сотрудники могут КА не тратить время на прослушивание длинных «гудков вызова» и подключаются только при успешном соединении с абонентами. Как следствие, снижается нагрузка на операторов колл-центров, улучшаются условия и результативность их работы.

Конечно, возможно и автоматическое воспроизведение стандартных «речевых обращений» к должникам (таким средством пользуется, в частности, ряд банков). Однако практика показывает, что эти средства оказываются малоэффективными – должники часто сразу «сбрасывают» вызовы.

На российском рынке присутствует достаточно много систем автобзона, которые могут быть применены в КА. Отметим следующие: 1) Avaya Proactive Contact – сайт www.avaya.com; 2) «Автопрозвонка 4.09» от Wentor Software – сайт www.wentor.ru; 3) «Автоинформатор» от ЗАО «Линия 24» (<https://www.line24.ru/products/autodialer>) и т.д.

Таким образом, использование ИТКТ в деятельности КА осуществляется по различным направлениям; является ключевым «инструментом» обеспечения деятельности «КА в целом» и их отдельных сотрудников. Однако одновременно применение ИТКТ приводит к росту угроз информационной и, как следствие, экономической безопасности работы КА.

Источники угроз и структура рисков деятельности коллекторских агентств. Источники угроз для деятельности КА целесообразно разделить на две большие группы: внешние угрозы и внутренние. Следствиями этих угроз являются риски деятельности КА. При этом существенно, что риски по отдельным направлениям в общем случае могут быть взаимосвязанными [7], усиливать влияние друг друга.

В качестве **внешних угроз** для КА укажем следующие: 1. Общее ухудшение экономической ситуации в стране и отдельных регионах. Это объективно снизит возможности возврата долгов заемщиками, в том числе из-за увеличения безработицы, сокращения зарплат и иных выплат населению. 2. Изменение федерального законодательства, приводящее к «ужесточению» условий деятельности КА; введению дополнительных ограничений на действия сотрудников КА по возврату долгов; изменению условий банкротства физических лиц. 3. Действия конкурирующих КА, в том числе в отношении «переманивания» сотрудников на работу; получения «долгов для взыскания» у тех КФО, с которыми традиционно работают конкретные КА и др. 4. Действия «контролирующих организаций», которые могут выходить за рамки «правового поля». 5. «Организованные информационные компании» против конкретных КА с использованием интернета, средств массовой информации и пр. 6. Деятельность АКА, которая более подробно рассматривается далее. 7. Перебои в электроснабжении КА. Даже при наличии источников бесперебойного питания (ИБП) прекращение энергоснабжения КА уже через 10–15 минут приводит к неработоспособности отдельных ПЭВМ. С применением мощных ИБП работу серверов при отключении электропитания в типичных случаях можно обеспечить в течение лишь 1–1,5 часов. Поэтому для КА может быть целе-

сообразным осуществлять хостинг своих сайтов на оборудовании специализированных фирм, имеющих сервера в различных точках страны. 8. Отказ разработчиков, специализированных ПС от их сопровождения после истечения сроков, предусмотренных в договорах на создание таких ПС. Это может приводить к необходимости перехода КА на совершенно новые ПС, в том числе иногда с полным изменением структуры БД ИСС, переучиванием сотрудников на новые ПС и др.

Внутренние угрозы для КА: 1. Недостаточная квалификация и/или мотивация деятельности персонала КА (прежде всего операторов колл-центров) может приводить к неэффективности работы КА в целом. 2. Нарушения ИБ в деятельности КА, которые могут приводить к утечкам персональной информации о должниках. Как следствие, возможно предъявление должниками требований о возмещении ущерба (вреда), в том числе через суды общей юрисдикции. 3. Выход в КА из строя компьютерного оборудования. Возможные причины: было закуплено недостаточно надежное оборудование; условия эксплуатации оборудования неудовлетворительные, в том числе из-за систематических скачков напряжения питания – в случае если не применяются качественные сетевые фильтры или ИБП. 4. Недостаточно высокая надежность защиты, обеспечиваемая применяемыми в КА антивирусными и антиспамовыми ПС, программами-файрволами. 5. Выявление с течением времени «уязвимостей» в ПС, используемых на серверах и ПЭВМ КА. При этом практика показывает, что информация о таких уязвимостях быстро распространяется через интернет, а разработчики ПС устраняют обнаруженные уязвимости с опозданием. В течение таких пауз «хакеры» могут осуществлять успешные атаки на сайты и иные ПС, используемые в деятельности КА. 6. Серьезную угрозу для деятельности КА представляет несанкционированный доступ к данным о его персонале – прежде всего со стороны АКА. Причины: АКА могут использовать эти сведения для «незаконного получения информации» от сотрудников КА; также для АКА представляют интерес сведения и об уволившихся сотрудниках, часто являющихся носителями «коммерчески значимой информации». Сведения о персонале КА представляет интерес и для КА-конкурентов, в том числе для целей «стимулирования» перехода в них лиц, уже имеющих опыт работы в коллекторском бизнесе.

Рассмотрим более подробно **угрозы для деятельности коллекторских агентств со стороны АКА**. С момента вступления в действие главы X (*Банкротство гражданина*) документа [16] услуги по оформлению банкротства ФЛ начали оказывать различные организации. При этом с позиций интересов КА наибольшие риски несет деятельность АКА. Несмотря на название, они являются коммерческими организациями, а не государственными и не общественными. В типичных случаях АКА (или юридические фирмы, выполняющие такие функции) работают либо за проценты от тех сумм, которые должны были выплатить заемщики, либо по фиксированным расценкам. Некоторые АКА имеют всероссийский уровень, но с региональными отделениями. Для привлечения клиентов АКА широко используют интернет-технологии, наружную рекламу, рекламу на транспорте и пр. Отметим, например, фирму «Чистый лист» (сайт головной организации <http://chistiylist.com/>). Она имеет много региональных отделений, которые предлагают, в частности, такие виды услуг: 1) поиск ошибок в договорах заемщиков с банками или МФО, которые позволяют признать эти документы полностью или частично недействительными; 2) защиту интересов заемщиков в судах, в том числе поддержка их действий по «принудительному» снижению процентных ставок по кредитам через суд; 3) помощь в оформлении документов для получения отсрочки выплат по кредитам. Это может значительно увеличивать время взыскания долгов сотрудниками КА и, как следствие, снижать результативность работы таких агентств; 4) помощь в реструктуризации долгов, иногда с предоставлением средств самими отделениями АКА на условиях «коммерческих кредитов»; 5) переключение телефонных звонков из КА ФЛ-должникам на сотрудников, работающих в отделениях АКА; 6) проведение процедур банкротства ФЛ.

Отметим, что в интернете достаточно широко представлены предложения и других АКА. Деятельность АКА, даже носящих полностью законный характер, снижает рентабельность работы КА, банков, МФО; увеличивает для них риски невозвратов кредитов. При этом у КА имеются весьма ограниченные возможности не только «противодействия» АКА, но и отслеживания фактов их работы с должниками.

Подчеркнем, что высокая «активность» сотрудников КА, нарушение ими норм делового общения при работе с должниками и пр. могут способствовать обращениям последних в АКА, иные организации. Еще одним важным фактором риска является возможность утечки сведений о должниках в АКА через персонал КА, в том числе уже уволившийся из этих организаций. Это позволяет АКА сосредоточиться на работе с «потенциальной целевой аудиторией», в том числе с использованием телефонных звонков должникам, проведения личных встреч и пр.

Анализ направлений риск-менеджмента в деятельности коллекторских агентств. Общая схема процессов принятия и реализации решений, связанных с управлением КА, представлена на

рисунке. При этом необходимость использования методов риск-менеджмента (MPM) существует для большинства «элементов» этой схемы.

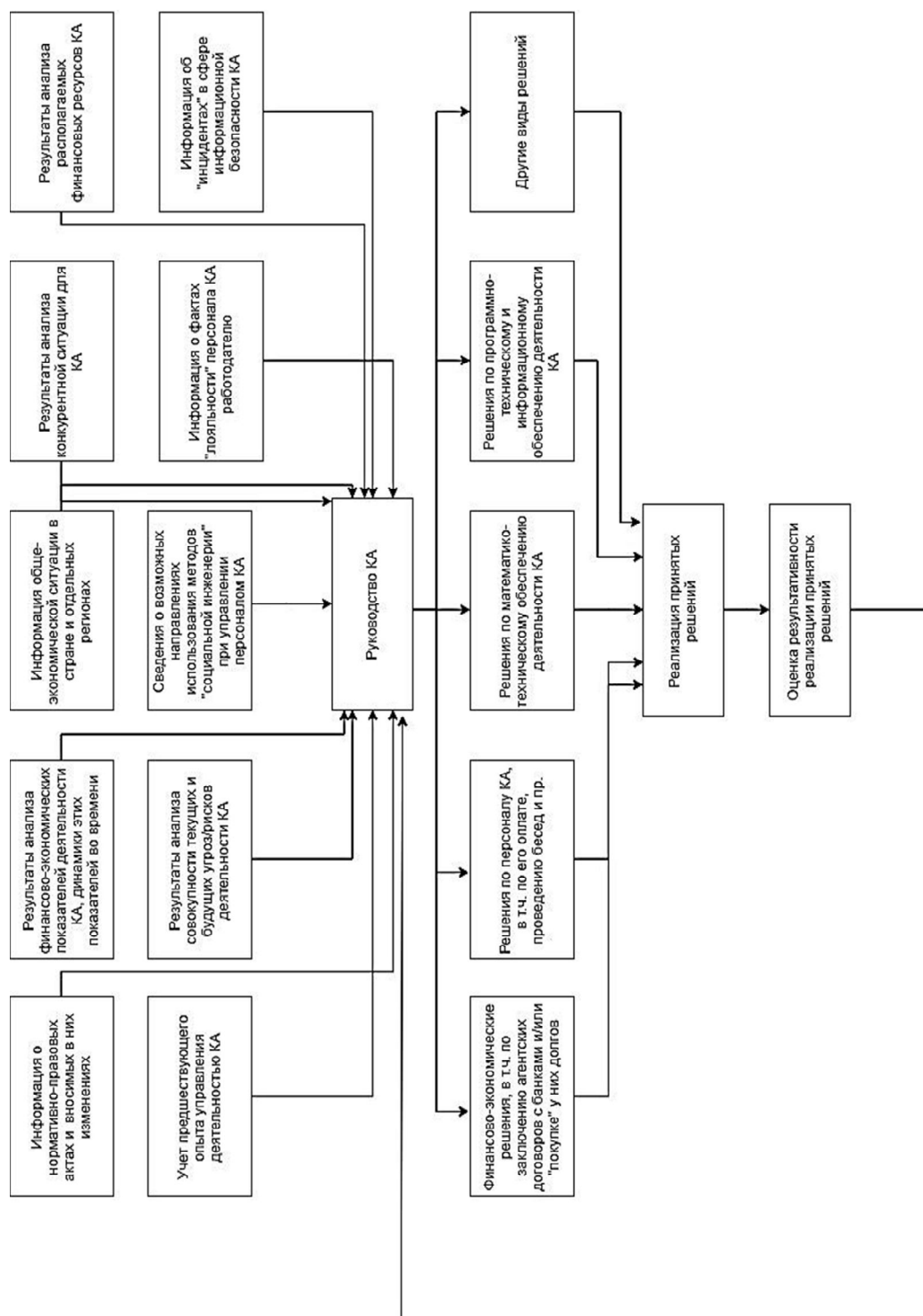


Рисунок – Общая схема процессов принятия и реализации решений, связанных с управлением КА

В отношении «информации о нормативно-правовых актах» МРМ связаны с мониторингом изменений в законодательстве, аудита внутренних нормативных документов КА на предмет соответствия внесенным в законодательство изменениям. При анализе «финансово-экономических показателей деятельности КА» МРМ относятся к обеспечению достоверности, актуальности и полноты информации, используемой для анализа; применению адекватных методов для анализа и наглядного представления результатов (в том числе в динамике). При анализе «общеекономической ситуации» МРМ относятся, в первую очередь, к обеспечению актуальности текущей информации, а также обоснованности прогнозов ее изменения со временем. В отношении «оценки конкурентной ситуации» для конкретного КА МРМ должны быть направлены на обеспечение полноты и своевременности сбора информации (легальными методами) о деятельности КА-конкурентов и АКА; об изменениях политики банков и МФО в отношении заключения АД с КА и/или продажи им долгов. При анализе «располагаемых финансовых ресурсов» МРМ требуют объективного учета всех обязательных платежей, которые предстоит сделать КА; снижения вероятности появления «внеплановых платежей», включая различные штрафы и пр. В отношении «учета предшествующего опыта» работы КА с позиций использования МРМ может быть полезным накопление «предыдущих решений и оценок их результативности» в БД ИСС агентств – это в последующем позволит организовать «поиск по прецедентам». Для анализа «угроз и рисков» деятельности КА могут использоваться различные подходы, включая SWOT-анализ, диаграмма Ишикавы («рыбий скелет») и пр. В отношении применения «методов социальной инженерии» при управлении персоналом МРМ должны учитывать вероятностный характер реакций ФЛ на «управляющие воздействия», в том числе с учетом периодических изменений самочувствия сотрудников, их эмоционального состояния и пр. В отношении фактов «нелояльности персонала» МРМ предполагают своевременное получение соответствующей информации, в том числе с применением технических средств. В отношении «информационной безопасности» КА МРМ должны опираться на следующее: общий анализ сведений о «вирусной активности» и хакерских атаках в интернет-пространстве; изучение данных об инцидентах информационной безопасности непосредственно в КА.

В отношении «Принятия решений руководством КА» МРМ должны обеспечивать их своевременность и обоснованность, документирование решений, контроль их доведения до конкретных исполнителей (это касается всех видов решений, представленных на рисунке). Особое значение имеют «решения по персоналу КА», а также психология восприятия этих решений сотрудниками.

В отношении «реализации решений» МРМ относятся преимущественно к контролю качества и сроков выполнения решений. При этом «контроль сроков исполнения» может быть одним из функциональных модулей ИСС КА.

«Оценка результативности» реализованных решений может осуществляться на основе как качественных, так и количественных показателей деятельности КА в целом, подразделений, отдельных сотрудников. При этом необходимо учитывать, что результаты некоторых видов решений сказываются не сразу. В отношении «оценки результативности» МРМ должны быть направлены на обеспечение достоверности и точности сбора информации, применения адекватных подходов к ее оценкам. При необходимости результаты таких оценок могут быть использованы для оперативной корректировки решений или их отмены.

Модели оценки/прогнозирования экономической эффективности работы коллекторских агентств. С целью представления модели используем вариант, соответствующий конечно-разностной дискретизации для явной двухслойной разностной схемы по времени: текущее время « t »; следующий временной слой – « $t + \Delta t$ », где Δt – шаг по времени. Примем для момента времени t следующие показатели: S_t – объем финансовых средств, имеющихся на счетах КА (тыс. руб.); $D_t^{(АД)}, D_t^{(ПД)}$ – соответственно суммы долгов (тыс. руб.), по которым КА работает на основе «агентских договоров», и «долгов, приобретенных» у КФО; $k_t^{(АД)}, k_t^{(ПД)}$ – коэффициенты интенсивности поступления платежей в КА по этим двум типам долгов (в тысячах рублей – на каждые 1000 руб. долга, за единицу времени); $k_t^{(ЗАР)}, k_t^{(МТО)}, k_t^{(МТС)}, k_t^{(ДРП)}$ – коэффициенты интенсивности расходования средств по таким направлениям: на зарплату персоналу; на материально-техническое обеспечение деятельности КА; на приобретение/обслуживание ПТС; на «другие платежи», включая коммунальные и направленные на контроль «нелояльности» персонала (в тысячах рублей за единицу времени).

Представим модель для « S » в виде

$$S_{t+\Delta t} = S_t + k_t^{(АД)} D_t^{(АД)} (\Delta t) + k_t^{(ПД)} D_t^{(ПД)} (\Delta t) -$$

$$k_t^{(3AP)}(\Delta t) - k_t^{(MTO)}(\Delta t) - k_t^{(MTC)}(\Delta t) - k_t^{(ДРП)}(\Delta t). \quad (1)$$

При этом

$$k_t^{(АД)} = f_1(k_t^{(3AP)}, k_t^{(MTO)}, k_t^{(MTC)}, k_t^{(ДРП)}), \quad (2)$$

$$k_t^{(ПД)} = f_2(k_t^{(3AP)}, k_t^{(MTO)}, k_t^{(MTC)}, k_t^{(ДРП)}). \quad (3)$$

где f_1, f_2 – некоторые функции, которые в общем случае могут быть различными для этих двух типов долгов. Начальное условие для S

$$S_{t=0} = S_0. \quad (4)$$

Переход на новый временной слой для $D^{(АД)}$ представим с использованием следующих коэффициентов «интенсивностей процессов»: $k_t^{(БАНКР)}$, $k_t^{(изм\%)}$ – для банкротств и принудительного изменения процентов по кредитам по решению судов (в тыс. руб. – на каждые 1000 руб. долга, за единицу времени); $k_t^{(HАД)}$, $k_t^{(HПД)}$ – соответственно для получения новых долгов по АД и путем покупки долгов (в тыс. руб., за единицу времени)

$$D_{t+\Delta t}^{(АД)} = D_t^{(АД)} - k_t^{(АД)} D_t^{(АД)}(\Delta t) - k_t^{(БАНКР)} D_t^{(АД)}(\Delta t) - k_t^{(изм\%)} D_t^{(АД)}(\Delta t) + k_t^{(HАД)}(\Delta t). \quad (5)$$

Отметим, что $k_t^{(БАНКР)}$, $k_t^{(изм\%)}$ зависят от времени, но не от действий КА. В то же время

$$k_t^{(HАД)} = f_3(S_t, D_t^{(АД)}, k_t^{(АД)}, D_t^{(ПД)}, k_t^{(ПД)}, k_t^{(БАНКР)}, k_t^{(изм\%)}). \quad (6)$$

Аналогично

$$D_{t+\Delta t}^{(ПД)} = D_t^{(ПД)} - k_t^{(ПД)} D_t^{(ПД)}(\Delta t) - k_t^{(БАНКР)} D_t^{(ПД)}(\Delta t) - k_t^{(изм\%)} D_t^{(ПД)}(\Delta t) + k_t^{(HПД)}(\Delta t). \quad (7)$$

При этом

$$k_t^{(HПД)} = f_4(S_t, D_t^{(АД)}, k_t^{(АД)}, D_t^{(ПД)}, k_t^{(ПД)}, k_t^{(БАНКР)}, k_t^{(изм\%)}). \quad (8)$$

Для $D^{(АД)}$, $D^{(ПД)}$ принимаются следующие начальные условия:

$$D_{t=0}^{(АД)} = D_0^{(АД)}; D_{t=0}^{(ПД)} = D_0^{(ПД)}. \quad (9)$$

В рамках этой модели управление рисками осуществляется в основном за счет следующих действий: определение направлений и рациональных объемов затрат, влияющих на совокупность коэффициентов « k » в данной модели; принятие и реализация решений о заключении дополнительных АД, определение рациональных объемов долгов по ним; определение целесообразности дополнительной «покупки» долгов у КФО, объемов этих дополнительных долгов. Кроме того, с позиций МРМ может быть важен выбор конкретных КФО, работу с «должниками» которых будет проводить КА. Причина – для должников разных КФО могут быть разные вероятности возврата кредитов, так как в них может проводиться различная политика по выдаче кредитов, передачи просроченных задолженностей КА и пр.

В типичных случаях объемы средств, которые может выделить КА на направление затрат, «снижение рисков деятельности» является ограниченным. Поэтому может решаться оптимизационная задача о распределении таких средств по отдельным направлениям. Однако в формально-математическом отношении решение этой задачи затрудняется сложностью выбора функций $f_1 \dots f_4$. С другой стороны, «экспертный подход» в оптимизации распределения средств по указанным направлениям реализовать сложно. Причина – внутри КА обычно нет достаточного количества специалистов, которые могут давать такие оценки, исходя из интересов КА в целом, а не тех подразделений, в которых они работают.

Для величины « $S_{t+\Delta t}$ » есть некоторое оптимальное значение, зависящее от оценок рисков со стороны лиц, принимающих решения. 1. Отрицательное прогнозное значение $S_{t+\Delta t}$ требует срочной оперативной корректировки политики КА. 2. Если значение $S_{t+\Delta t}$ будет небольшим в условиях высоких рисков, то это будет приводить к повышенной «экономической уязвимости» КА, к неблагоприятным внешним воздействиям. Одним из факторов таких рисков может являться, в частности, высокая «вариабельность по времени» для объемов средств, поступающих от должников за период (Δt) – это может приводить к кратковременной нехватке средств, необходимых для оперативной деятельности КА. 3. С другой стороны, чрезмерно высокое значение $S_{t+\Delta t}$ будет приводить к недостаточному использованию имеющихся средств, которые могли бы быть приме-

нены, например, для приобретения дополнительных «долгов» у КФО – потенциально это могло бы дать в дальнейшем дополнительный доход КА. При определении целесообразных объемов «приобретенных» у КФО долгов КА могут ориентироваться на два основных прогнозных значения. 1. Отношение «объемов этих долгов» к «интенсивности их возвратов». В содержательном плане это может быть интерпретировано как «длительность периода времени, за которые имеющиеся долги будут возвращены полностью». Увеличение этого периода фактически будет приводить к снижению «скорости оборота» тех средств, которые «вложены» КА в приобретение долгов у КФО. 2. Прогнозное значение «коэффициента возврата» для «приобретенных у КФО долгов». Оно может быть оценено исходя из опыта предыдущей деятельности КА (при условии, что не было резкого изменения контингента должников). Этот коэффициент возврата априорно меньше 100 % по следующим причинам: банкротство должников; «принудительное» уменьшение процентов по кредитам по решениям судов; смерть должников; некоторые иные причины, исключающие выплату должниками задолженностей.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать следующие **выводы**: 1. Деятельность КА России протекает в условиях острой конкуренции между ними; наличия различных видов рисков – в том числе и относящихся непосредственно к решениям руководства КА, деятельности его персонала, активности АКА. Это, в конечном счете, отражается на уровнях «экономической безопасности» КА, их «уязвимости» к воздействию неблагоприятных процессов, событий. 2. Информатизация деятельности КА повышает производительность труда сотрудников КА, снижает вероятности совершения ими различного рода технических ошибок. 3. Однако одновременно расширение использования ИТКТ в деятельности КА увеличивает риски ИБ и, как следствие, риски «экономической безопасности». 4. У руководства КА имеются различные возможности по управлению рисками деятельности, в том числе для обеспечения взаимодействия с должниками с использованием средств ИТКТ, контроля и управления работой персонала. 5. Однако практическая реализация этих возможностей обычно требует значительных расходов; обеспечивает лишь определенные уровни вероятности достижения желаемых результатов, не гарантирует полной защиты от существующих угроз, и особенно от тех, которые могут возникнуть в будущем. 6. Построенные математические модели могут быть использованы для имитационного моделирования деятельности КА на достаточно длительных промежутках времени, так как они не предусматривают учета отдельных «операций поступления и расходования средств».

Библиографический список

1. Александрова Л. С. Взаимодействие микрофинансовых организаций с коллекторскими агентствами / Л. С. Александрова // Экономика. Бизнес. Банки. – 2015. – № 4 (13). – С. 47–55.
2. Ажмухамедов И. М. Оценка состояния защищенности данных организации в условиях возможности реализации угроз информационной безопасности / И. М. Ажмухамедов, О. М. Князева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3 (31). – С. 24–39.
3. Ахметжанова С. Коллекторская деятельность в Казахстане / С. Ахметжанова, С. Кузгибекова, М. Тусупбеков // Общество и экономика. – 2016. – № 10. – С. 107–112.
4. Бегларян Г. В. Правовое регулирование деятельности коллекторских агентств / Г. В. Бегларян // Права человека как фундаментальная цель политики и управления : научно-практическая конференция студентов, магистров, аспирантов. – 2016. – С. 7–10.
5. Брумштейн Ю. М. Комплексный анализ факторов информационной и интеллектуальной безопасности регионов / Ю. М. Брумштейн, А. Н. Подгорный // Информационная безопасность регионов. – 2011. – № 1 (8). – С. 8–14.
6. Брумштейн Ю. М. Анализ рисков информационной безопасности организаций, связанных с расположением, конструкциями и особенностями эксплуатации зданий / Ю. М. Брумштейн, И. А. Дюдилов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 148–167.
7. Брумштейн Ю. М. О некоторых моделях управления взаимосвязанными рисками / Ю. М. Брумштейн // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2015. – № 13 (177). – С. 95–100.
8. Викторова К. С. О сроках давности привлечения коллекторских агентств к административной ответственности за нарушения Федерального закона № 230-ФЗ / К. С. Викторова // Время открытий. – 2019. – № 3 (3). – С. 3–10.
9. Выборнова О. Н. Управление рисками информационной безопасности в условиях неопределенности / О. Н. Выборнова, И. М. Ажмухамедов, Ю. М. Брумштейн // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2016. – № 1. – С. 7–14.
10. Жданухин Д. Ю. Ведение реестра коллекторских агентств в России: возможные сложности / Д. Ю. Жданухин // Законы России: опыт, анализ, практика. – 2016. – № 11. – С. 15–23.

11. Зеничев Н. А. Использование незаконных тактик взыскания денежных средств коллекторскими агентствами и методы борьбы с ними в странах англо-саксонской правовой семьи / Н. А. Зеничев // *Baikal Research Journal*. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 19.
12. Крылов М. В. Коллекторское агентство: российский и зарубежный опыт / М. В. Крылов // *Символ науки*. – 2016. – № 12-1 (24). – С. 129–133.
13. Махова А. В. Деятельность коллекторских агентств России в 2014–2018 годах / А. В. Махова, А. Р. Курячая // *Экономика и бизнес: теория и практика*. – 2019. – № 7. – С. 122–125.
14. Мирошниченко Ю. В. Проблемы правового регулирования деятельности коллекторских агентств / Ю. В. Мирошниченко, Н. Н. Столбовская // *Вестник научных конференций*. – 2016. – № 4-5 (8). – С. 137–138.
15. О банках и банковской деятельности. ФЗ № 395-1 от 02.12.1990 (в ред. от 26.07.2019). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5842/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
16. О несостоятельности (банкротстве). ФЗ № 127 от 26.10.2002 (ред. от 03.07.2019). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39331/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
17. О защите прав и законных интересов физических лиц при осуществлении деятельности по возврату просроченной задолженности и о внесении изменений в Федеральный закон «О микрофинансовой деятельности и микрофинансовых организациях». ФЗ № 230 от 3 июля 2016 года (в ред. от 26.07.2019). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200497/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
18. О микрофинансовой деятельности и микрофинансовых организациях № 151-ФЗ от 02.07.2010 (в ред. от 02.08.2019). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102112/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
19. О персональных данных. ФЗ № 152 от 27.07.2006 (в ред. от 31.12.2017). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
20. Осипова М. А. Правовое регулирование коллекторской деятельности: Россия и зарубежный опыт / М. А. Осипова // *Известия Байкальского государственного университета*. – 2016. – Т. 26, № 5. – С. 793–799.
21. Сергеев М. И. Коллекторские агентства и федеральная служба судебных приставов: некоторые вопросы налаживания взаимовыгодного сотрудничества / М. И. Сергеев // *Дискурс*. – 2017. – № 5 (7). – С. 198–203.
22. Серебренникова О. С. Договорные отношения между коллекторскими агентствами и кредитными организациями в процессе возврата кредиторской задолженности / О. С. Серебренникова // *Интеграция наук*. – 2018. – № 7 (22). – С. 116–117.
23. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 года № 197-ФЗ (ред. от 02.08.2019) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
24. Углов И. В. Анализ проблем подключения коллекторских агентств к сети оператора связи / И. В. Углов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. – 2016. – Т. 10, № 9. – С. 73–75.
25. Федоров А. Коллекторские мифы: «Покупка долгов коллекторскими агентствами» / А. Федоров. – Режим доступа: <https://www.klerk.ru/buh/articles/115708/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.10.2019).
26. Филонов А. В. Сферы и методы коллекторской деятельности / А. В. Филонов // *Вестник СевКав-ГТИ*. – 2017. – № 1 (28). – С. 105–109.
27. Царькова Д. Р. Правовое регулирование деятельности коллекторских агентств / Д. Р. Царькова // *Право и практика*. – 2014. – № 4. – С. 54–59.

References

1. Aleksandrova L. S. Vzaimodeystvie mikrofinansovykh organizatsiy s kollektorskimi agentstvami [Interaction of microfinance organizations with collecting agencies]. *Ekonomika. Biznes. Banki* [Economics. Business. Banks], 2015, no. 4 (13), pp. 47–55.
2. Azhmukhamedov I. M., Knyazeva O. M. Otsenka sostoyaniya zashchishchennosti dannykh organizatsii v usloviyakh vozmozhnosti realizatsii ugroz informatsionnoy bezopasnosti [Assessment of the state of security of the data of the organization in the conditions of the possibility of implementing threats to information security]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 3 (31), pp. 24–39.
3. Akhmetzhanova S., Kuzgibekova S., Tusupbekov M. Kollektorskaya deyatelnost v Kazakhstane [Collecting activities in Kazakhstan]. *Obshchestvo i ekonomika* [Society and Economics], 2016, no. 10, pp. 107–112.
4. Beglaryan G. V. Pravovoe regulirovanie deyatelnosti kollektorskiykh agentstv [Regulation of Collection Agencies]. *Prava cheloveka kak fundamentalnaya tsel politiki i upravleniya : nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, magistr, aspirantov* [Human Rights as a Fundamental Goal of Policy and Management : Scientific and Practical Conference of Students, Masters, Postgraduate Students], 2016, pp. 7–10.
5. Brumshteyn Yu. M., Podgornyy A. N. Kompleksnyy analiz faktorov informatsionnoy i intellektualnoy bezopasnosti regionov [Comprehensive analysis of information and intellectual security factors of regions]. *Informatsionnaya bezopasnost regionov* [Information Security of Regions], 2011, no. 1 (8), pp. 8–14.

6. Brumshteyn Yu. M., Dyudikov I. A. Analiz riskov informatsionnoy bezopasnosti organizatsiy, svyazannykh s raspolozheniem, konstruktivnymi i oso-bennostyami ekspluatatsii zdaniy [Analysis of information security risks of organizations related to the location, structures and peculiarities of building operation]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 148–167.
7. Brumshteyn Yu. M. O nekotorykh modelyakh upravleniya vzaimosvyazannymi riskami [On Some Models of Interconnected Risk Management]. *Izvestiya VolgaGTU. Seriya «Aktualnye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh»* [News of the Volga GTU, Series "Current Problems of Management, Computer Engineering and Informatics in Technical Systems"], 2015, no. 13 (177), pp. 95–100.
8. Viktorova K. S. O srokakh davnosti privlecheniya kollektorskiykh agentstv k administrativnoy otvetstvennosti za narusheniya federal'nogo zakona № 230-FZ [On the statute of limitations of bringing collecting agencies to administrative responsibility for violations of Federal Law No. 230-FL]. *Vremya otkrytiy* [Time of Discovery], 2019, no. 3 (3), pp. 3–10.
9. Vybornova O. N., Azhmukhamedov I. M., Brumshteyn Yu. M. Upravlenie riskami informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh neopredelennosti [Information security risk management in conditions of uncertainty]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternye sistemy* [Information Security Problems. Computer Systems], 2016, no. 1, pp. 7–14.
10. Zhdanukhin D. Yu. Vedenie reestra kollektorskiykh agentstv v Rossii: vozmozhnye slozhnosti [Maintenance of the register of collecting agencies in Russia: possible difficulties]. *Zakony Rossii: opyt, analiz, praktika* [Laws of Russia: Experience, Analysis, Practice], 2016, no. 11, pp. 15–23.
11. Zenichev N. A. Ispolzovanie nezakonnykh taktik vyzskaniya denezhnykh sredstv kollektorskimi agentstvami i metody borby s nimi v stranakh anglo-saksonskoy pravovoy semi [Use of illegal tactics of collection of funds by collecting agencies and methods of combating them in the countries of the Anglo-Saxon legal family]. *Baikal Research Journal* [Baikal Research Journal], 2016, vol. 7, no. 1, p. 19.
12. Krylov M. V. Kollektorskoe agentstvo: rossiyskiy i zarubezhnyy opyt [Collection Agency: Russian and Foreign Experience]. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, no. 12-1 (24), pp. 129–133.
13. Makhova A. V., Kuryachaya A. R. Deyatel'nost kollektorskiykh agentstv Rossii v 2014–2018 godakh [Activities of collecting agencies of Russia in 2014–2018]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and business: theory and practice], 2019, no. 7, pp. 122–125.
14. Miroshnichenko Yu. V., Stolbovskaya N. N. Problemy pravovogo regulirovaniya deyatel'nosti kollektorskiykh agentstv [Problems of legal regulation of activities of collecting agencies]. *Vestnik nauchnykh konferentsiy* [Journal of Scientific Conferences], 2016, no. 4–5 (8), pp. 137–138.
15. *O bankakh i bankovskoy deyatel'nosti. FZ № 395-1 ot 02.12.1990 (v red. ot 26.07.2019)* [About banks and banking activities. FL no. 395-1 from 02.12.1990 (ed. from 26.07.2019)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5842/ (accessed 15.10.2019).
16. *O nesostoyatel'nosti (bankrotstve). FZ № 127 ot 26.10.2002 (red. ot 03.07.2019)* [About insolvency (bankruptcy). FL no. 127 of 26.10.2002 (ed. of 03.07.2019)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39331/ (accessed 15.10.2019).
17. *O zashchite prav i zakonnykh interesov fizicheskikh lits pri osushchestvlenii deyatel'nosti po vozvratu prosrochennoy zadolzhennosti i o vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon «O mikrofinansovoy deyatel'nosti i mikrofinansovykh organizatsiyakh». FZ № 230 ot 3 iyulya 2016 goda (v red. ot 26.07.2019)* [Protection of the Rights and Legitimate Interests of Natural Persons in the Course of Activities to Recover Overdue Debts and Amendments to the Federal Law "On Microfinance Activities and Micro-Financial Organizations." Federal Law no. 230 of 3 July 2016 (ed. 26.07.2019)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200497/ (accessed 15.10.2019).
18. *O mikrofinansovoy deyatel'nosti i mikrofinansovykh organizatsiyakh № 151-FZ ot 02.07.2010 (v red. ot 02.08.2019)* [On microfinance activities and microfinance organizations no. 151-ФЗ dated 02.07.2010 (ed. 02.08.2019)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102112/ (accessed 15.10.2019).
19. *O personalnykh dannykh. FZ № 152 ot 27.07.2006 (v red. ot 31.12.2017)* [About personal data. Federal Law No. 152 of 27.07.2006 (in an edition of 31.12.2017)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (accessed 15.10.2019).
20. Osipova M. A. Pravovoe regulirovaniye kollektorskoj deyatel'nosti: Rossiya i zarubezhnyy opyt [Legal regulation of collecting activities: Russia and foreign experience]. *Izvestiya Baykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the Baikal State University], 2016, vol. 26, no. 5, pp. 793–799.
21. Sergeev M. I. Kollektorskie agentstva i federal'naya sluzhba sudebnykh pristavov: nekotorye voprosy nalazhivaniya vzaimovыgodnogo sotrudnichestva [Collecting agencies and the Federal Service of Judicial Officers: some issues of establishing mutually beneficial cooperation]. *Diskurs* [Discourse], 2017, no. 5 (7), pp. 198–203.
22. Serebrennikova O. S. Dogovornye otnosheniya mezhdu kollektorskimi agentstvami i kreditnymi organizatsiyami v protsesse vozvrata kreditorskoy zadolzhennosti [Contractual relations between collecting agencies and credit institutions in the process of payables recovery]. *Integratsiya nauk* [Integration of Sciences], 2018, no. 7 (22), pp. 116–117.
23. *Trudovoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2001 goda № 197-FZ (red. ot 02.08.2019)* [Labor Code of the Russian Federation of December 30, 2001 no. 197-FL (ed. 02.08.2019)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (accessed 15.10.2019).

24. Uglov I. V. Analiz problem podklyucheniya kollektorskikh agentstv k seti operatora svyazi [Analysis of problems of connection of collecting agencies to the carrier network]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2016, vol. 10, no. 9, pp. 73–75.
25. Fedorov A. *Kollektorskie mify: «Pokupka dolgov kollektorskimi agentstvami»* [Collection myths: "Purchase of debts by collection agencies"]. Available at: <https://www.klerk.ru/buh/articles/115708/> (accessed 15.10.2019).
26. Filonov A. V. Sfery i metody kollektorskoy deyatel'nosti [Spheres and Methods of Collecting Activities]. *Vestnik SevKavGTI* [SevKavGTI Bulletin], 2017, no. 1 (28), pp. 105–109.
27. Tsarkova D. R. Pravovoe regulirovanie deyatel'nosti kollektorskikh agentstv [Legal regulation of the activities of collecting agencies]. *Pravo i praktika* [Law and practice], 2014, no. 4, pp. 54–59.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.099-109

УДК 004.942

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ¹

Статья поступила в редакцию 03.10.2019, в окончательной варианте – 23.11.2019.

Курочкин Леонид Михайлович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, кандидат технических наук, e-mail: kurochkinl@gmail.com

Чернышев Александр Сергеевич, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, 194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, научный сотрудник, e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Курочкин Михаил Александрович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, кандидат технических наук, доцент, e-mail: kurochkin.m@gmail.com

Чуватов Михаил Владимирович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ведущий программист, e-mail: irongate@yandex.ru

Необходимость повышения безопасности дорожного движения, обеспечения мониторинга движения транспорта, управления его маршрутизацией требует оперативного развития интеллектуальных транспортных сетей. Основным средством, используемым при проектировании интеллектуальных транспортных сетей, является компьютерное моделирование. Существующие модели транспортных систем часто предполагают поиск компромисса между точностью результатов моделирования и временем проведения вычислительных экспериментов с моделями – из-за использования представления транспортной системы только на микро- или макроуровне. Гибридные решения моделей транспортных сетей, позволяющие производить моделирование транспортных потоков на микро- и макроуровнях, а также осуществлять оперативный переход между ними в существующей литературе, не представлены. В настоящей работе приведено обоснование целесообразности разработки гибридной модели; предложен подход, обеспечивающий переход между микро- и макроуровнями моделей транспортных сетей. Предложенное решение реализовано с использованием макроскопического симулятора транспортных сетей SUMO и оригинальной континуальной модели транспортных потоков. Разработанный подход позволяет значительно сократить время моделирования транспортных потоков в крупных городах без ущерба для точности (адекватности) получаемых результатов.

Ключевые слова: гибридная модель транспортной сети, континуальная модель транспортного потока, микро- и макромоделей транспортных сетей, критерии перехода между микро- и макромоделями, SUMO, интеллектуальные транспортные системы

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF HYBRID MODELS OF TRANSPORT SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 03.10.2019, in the final version – 23.11.2019.

Kurochkin Leonid M., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Ph.D., e-mail: kurochkinl@gmail.com

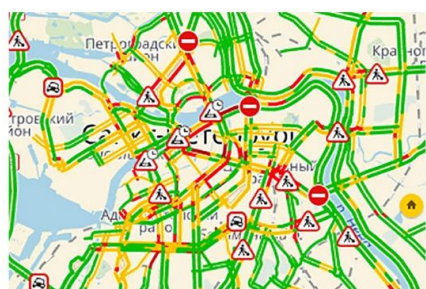
Chernyshev Alexander S., Institute of Physics and Technology named after A.F. Ioffe, 26 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation, Researcher, e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Kurochkin Mikhail A., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kurochkin.m@gmail.com

Chuvatov Mikhail V., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Leading Programmer, e-mail: irongate@yandex.ru

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00430. This work was supported by the RFBR grant No. 18-07-00430.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Разработка и исследование критериев перехода между микро и макро уровнями моделей транспортных сетей

Development and research of transition criteria between micro and macro levels of transport network models



Построение гибридных моделей транспортных сетей регионов
Building hybrid models of regional transport networks



The need to improve road safety, ensure monitoring of transport, manage its routing requires the rapid development of intelligent transport networks. The main tool used in the design of intelligent transport networks is computer simulation. Existing transport system models often offer a compromise between modeling accuracy and model runtime due to the use of the transport system representation only at the micro or macro level. At the moment, hybrid solutions of transport network models that allow modeling of traffic flows at the micro and macro levels and carry out an operational transition between them are not presented. In this paper, the rationale for the development of a hybrid model is justified, an approach is proposed that provides a transition between micro and macro levels of transport network models. The proposed solution is implemented using the SUMO macroscopic transport network simulator and the original continuum model of traffic flows. The developed approach can significantly reduce the modeling time of traffic flows of large cities without compromising accuracy.

Key words: transport network hybrid model, a continuous model of a traffic stream, micro and macro models of transport networks, transition criteria between micro and macro models, SUMO, Intelligent Transport Systems

Введение. Темпы роста количества используемых автомобилей в большинстве регионов России значительно опережают скорость строительства дорожных сетей, развития дорожной инфраструктуры. Это негативно сказывается на безопасности дорожного движения; приводит к образованию многокилометровых заторов; ухудшает состояние окружающей среды за счет выбросов в воздух от автомобильного транспорта, в том числе стоящего в заторах с работающими двигателями.

В последние годы особый интерес на государственном уровне вызывает создание и использование интеллектуальных транспортных сетей (ИТС) [6]. Ключевыми целями их использования являются следующие: повышение безопасности дорожного движения; предоставление водителям и пассажирам автомобилей доступа к сетевым информационным сервисам [9]; осуществление оперативного мониторинга и контроля дорожно-транспортной обстановки в городах и регионах.

Основным средством коммуникации, используемым в ИТС, являются глобальные и локальные беспроводные сети передачи данных. Каждый участник ИТС (автомобиль, элемент инфраструктуры ИТС) может выступать в роли приёмника (получателя), передатчика и ретранслятора данных. Мобильность абонентов телекоммуникационных сетей ИТС усложняет маршрутизацию данных – это особенно важно для локальных (mesh) сетей; снижает точность прогнозирования загрузки отдельных фрагментов глобальных сетей, что затрудняет обеспечение постоянного надёжного доступа к сервисам ИТС.

Основным средством, используемым при проектировании ИТС, является компьютерное моделирование. При этом особый интерес представляет исследование зависимостей свойств дорожного и сетевого трафиков от различных параметров. Указанные исследования необходимы для

построения адаптивных предсказательных моделей, позволяющих оперативно оценить загрузку транспортных и сетей передачи данных, провести планирование надёжной передачи данных в ИТС с учётом её динамики.

Целью данной работы является обоснование целесообразности разработки и использования гибридных моделей транспортных систем, реализующих моделирование на микро- и макроуровнях.

Основные подходы к построению моделей транспортных сетей. Существует два основных подхода к моделированию дорожного трафика, которые основаны на использовании микроскопических и макроскопических моделей. Микроскопические модели описывают индивидуальное поведение каждого участника дорожного движения с использованием значительного набора параметров, включая время реакции водителя на изменение дорожной обстановки, зависимости ускорений автомобилей от параметров движения соседних транспортных средств, движущихся в том же направлении, и др. [14, 15]. Такие модели являются наиболее детализированными, однако они наиболее требовательны к вычислительным ресурсам [16]. Таким образом, для задач, в которых время моделирования является критическим параметром, локальные модели не всегда могут быть применимы. Альтернативой могут служить континуальные модели дорожного трафика – макроскопические модели.

При построении таких моделей используется аналогия с движением жидкости и газа в рамках приближения «сплошной среды», когда от свойств отдельных молекул переходят к локальным параметрам среды. Для перехода используется процедура усреднения по контрольному объёму. При этом объём выбирается достаточно большим для попадания в него большого числа молекул, однако существенно меньшим по линейным размерам по сравнению с областью моделирования [5]. В случае с дорожными сетями можно утверждать, что континуальный подход применим на протяженных участках дорог с высокой плотностью дорожного трафика. При таких конфигурациях и условиях дорожной сети локальные модели дорожного трафика оказываются требовательными к вычислительным ресурсам.

Одни из первых континуальных математических моделей дорожного трафика использовали только уравнение баланса массы [12]. Особенностью таких моделей было предсказание нефизических скачков уплотнения трафика, которые могли приводить к заторам. Для устранения этого недостатка исходные уравнения были переформулированы в виде уравнения сохранения импульса с добавочными «источниковыми» слагаемыми, учитывающими влияние градиента давления и релаксацию поля скорости к некоторому равновесному значению [10, 11]. Выражение для давления описывает взаимное влияние соседних машин и отражает поведение водителя в плотном и разреженных автомобильных потоках, причём с ростом плотности давление также растёт.

Разработка гибридных моделей дорожного трафика, сочетающих свойства микроскопических и макроскопических моделей, позволит избежать постоянного расчёта индивидуальных характеристик всех участников ИТС. Использование гибридных моделей дорожного трафика позволит понизить требования к необходимым вычислительным мощностям, что даст более широкие возможности реализации моделей транспортных сетей городов и агломераций, необходимых для исследования зависимостей дорожного и сетевого трафиков.

Реализация моделей транспортных потоков. Существует множество подходов к построению моделей транспортных сетей. Активно используются энтропийные, гравитационные, гидрогазодинамические, стохастические модели, модели следования за лидером и др. Для построения моделей применяется обширный «инструментарий»: методы теории массового обслуживания, теория клеточных автоматов, теория графов и др. Активно развиваются программные симуляторы, позволяющие проводить имитационное моделирование транспортных сетей. Несмотря на это, универсальных средств моделирования транспортных потоков, позволяющих проводить исследования зависимостей транспортного и сетевого трафиков для моделей городов и агломераций, в литературе не представлено.

Внимание исследователей транспортных потоков привлекает уточнение микроскопических моделей. В работе [7] предложено использование разделения крупных городов на транспортные районы. Данное решение использует матрицы корреспонденций с применением гравитационной модели [1]. Последняя связывает интенсивность потока T_{ij} между общим количеством отправления из i -го района Q_i и прибытием в j -й район D_j и затраты на передвижение между районами i и j c_{ij} , а также цепей корреспонденций. Использование вышеуказанных структур данных позволяет повысить точность (адекватность) моделирования транспортных потоков города.

Отдельным направлением развития моделей транспортных сетей является разработка и исследование перколяционных стохастических моделей [4]. На основе использования этих моделей становится возможным описать зависимость вероятности блокирования отдельных узлов в зави-

симости от характеристик дорожного движения с течением времени. Указанные модели позволяют описывать правила обслуживания перекрестков, материальный баланс числа машин в системе и связи их потоков между соседними перекрестками.

Также для решения задач моделирования автомобильных потоков разрабатываются специализированные солверы, учитывающие специфику автомобильного трафика, индивидуальные свойства варьирования скоростей и дистанций между автомобилями, характерные для различных типов автомобильных потоков. В работе [3] предложен солвер, использующий для моделирования автомобильных потоков кратные шаги. Размер макрошага в указанной работе принимался равным среднему значению времени реакции водителя. Размер микрошага определялся по результатам оценки локальной ошибки вычисления скоростей, используемой схемы численного интегрирования. Солвер, представленный в [2], использует оригинальные схемы численного интегрирования с кратными шагами по времени, обеспечивающими индивидуальный выбор микрошагов для каждого макрошага вычислений. Использование предложенного метода позволяет значительно сократить время моделирования по сравнению с односторонним методом и получить оценку локальной ошибки не только для скоростей, но и для дистанций между автомобилями.

В представленной работе для описания транспортных потоков на макроуровне была выбрана гидродинамическая модель дорожного трафика. Выбор такого подхода обусловлен тем, что гидродинамические модели хорошо изучены и движения транспортных потоков во многом аналогичны движению сжимаемых сред по трубам. Гидродинамические модели хорошо масштабируются и позволяют описывать транспортные системы на разных уровнях, от района города до региона. Также, при необходимости расчета отдельных элементов дорожной сети на микроуровне, переход между моделями легко осуществим при помощи процедур усреднения и интерполяции данных.

SUMO – симулятор микроуровня для модернизации. Одним из популярных микроскопических симуляторов транспортных сетей является SUMO (Simulation of Urban MObility), разрабатываемый в Институте исследования транспорта (Institute of Transportation Systems, Германия). Данное решение реализует микроскопическую непрерывную модель дорожного трафика.

Название симулятора дословно: симуляция городской мобильности. Это фреймворк с открытым исходным кодом для моделирования транспортных потоков дорожных сетей. Так, SUMO реализует моделирование на микроскопическом уровне, обеспечивая индивидуальное описание свойств каждого участника дорожного движения. Модель SUMO позволяет учитывать взаимное влияние участников дорожного движения, реализуя безаварийную модель движения. Модели SUMO позволяют детально описывать свойства дорожных сетей и участников дорожного движения, включая смены ими полос дорожного движения, реализации управления светофорами, а также моделей пешеходов, оказывающих влияние на поведение транспортных средств.

Симулятор SUMO используется для проведения исследований различных тем, например, при разработке методов маршрутизации транспортных средств; алгоритмов работы светофоров; для разработки методов беспроводной маршрутизации данных для реализаций ИТС; а также при разработке и анализе стратегий движения беспилотных транспортных средств.

К ключевым особенностям SUMO можно отнести следующее:

1. Возможность реализации моделирования непрерывного движения участника движения в пространстве и времени.

2. Возможности реализации следующего:

- моделей различных типов транспортных средств, каждое из которых может двигаться по индивидуальному маршруту;
- многополосных дорог, на которых транспортные средства сами выбирают полосу для движения и момент для смены полосы;
- различных правил проезда перекрестков, в том числе регулируемых светофорами;
- значительных по размерам дорожных сетей (десятки тысяч улиц).

3. Интеграция с другими программными приложениями для импорта/экспорта данных, например, VISUM (<http://vision-traffic.ptvgroup.com>), Vissim (<http://www.vissim.com>), OSM (<https://www.openstreetmap.org>), RoboCup (<https://www.robocup.org>) и MATsim (<https://www.matsim.org>).

4. Кроссплатформенная реализация.

Микроскопическая непрерывная модель дорожного трафика индивидуально описывает свойства каждого «участника» модели. По этой причине при моделировании больших фрагментов дорожных сетей (города, агломерации) требуются значительные вычислительные ресурсы. Использование континуальной модели для описания фрагментов дорожных сетей городов и агломераций

позволит значительно сократить время моделирования, обеспечив возможность оперативного перехода между микроскопической и макроскопической (континуальной) моделью.

Математическая модель для макроуровня. За основу предложенной математической модели взяты наработки в области движения многофазных потоков и разработанного кода MFlow [8].

Система уравнений движения дорожного трафика в континуальном приближении эквивалентна системе уравнений Навье – Стокса для сжимаемой среды. Основу модели составляет уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

отражающее факт сохранения количества автомобилей на участке дороги. Плотность автомобильного потока имеет размерность количества автомобилей на 1 погонный метр дороги.

Для учета изменения скорости транспортного потока используется модифицированное уравнение сохранения импульса для сплошной среды:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + V \frac{\partial(\rho V)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\rho}{\tau} (V_e - V). \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части (2), выражающее влияние градиента давления в гидродинамике, проистекает из аналогии с микромоделью следования за лидером. Это слагаемое отражает тот факт, что каждый водитель учитывает окружающую дорожную обстановку: ускоряется и замедляется в соответствии с поведением соседних транспортных средств, движущихся в том же направлении. При снижении скорости автомобильного потока локальное значение давления растет. Это приводит к росту градиента давления и стремлению транспортных средств покинуть участок с высокой плотностью машин.

Второе слагаемое в правой части (2) выражает стремление потока к достижению некоторой скорости V_e , являющейся оптимальной в определенных условиях. Скорость V_e есть равновесная скорость потока, реализуемая при равномерном и однородном режимах движения по дороге. Параметр τ является характерным временем релаксации потока на каждом участке дороги. Он, в общем случае, зависит от параметров потока и типа транспортного средства. Иными словами, особенности психологии поведения конкретных водителей в данной модели нивелируются.

Выражение для V_e имеет в общем случае следующий вид:

$$V_e = V_0 - \tau(\rho)(1 - p(\rho))P,$$

где V_0 – заданная скорость на участке дороги, соответствует максимально разрешенной скорости; величина $p(\rho)$ является вероятностью перестроения – показателем того, с какой вероятностью автомобили будут обгонять транспортное средство, движущееся в том же направлении медленнее локальной скорости потока. Этот параметр позволяет учитывать локальную неоднородность скорости каждого отдельно взятого транспортного средства в каждой точке дороги.

Численный метод, используемый при моделировании на основе макромоделей. Численный метод основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках [17]. Исходные уравнения модели записываются в интегральной форме относительно расчетных ячеек сетки. Объемные интегралы от дивергенции и градиента при помощи формулы Остроградского – Гаусса приводятся к поверхностным интегралам. Используя допущение о том, что значения искомых величин остаются постоянными на всей поверхности каждой грани ячейки, интегралы можно переписать в виде конечных сумм по всем граням ячейки. Используется схема, в которой все величины хранятся в центрах ячеек.

Левые части уравнений сохранения включают в себя нестационарное слагаемое, отвечающее за изменение величины по времени, и конвективное слагаемое, отражающее изменение по пространству. Аппроксимация нестационарного слагаемого реализована при помощи неявной схемы Эйлера [17]. Используемая схема проста в реализации и подходит для анализа стационарных и квазистационарных режимов движения.

Для дискретизации конвективного слагаемого используются противопоточные схемы второго порядка точности по пространству. Используемые схемы удовлетворяют критерию TVD [18], переключаясь на первый порядок точности в областях резких скачков решения и возвращаясь на второй порядок в областях гладких решений.

Расчет поля давления и скорости реализован при помощи алгоритма SIMPLE [13].

Блок-схема алгоритма решения уравнений представлена на рисунке 1. Программная реализация включает автономный построитель дорожной сети, покрывающей ее сетки, а также препроцессор и решатель. Все компоненты разработаны с использованием языка программирования C++, а также библиотеки OpenMP для обеспечения возможности распараллеливания вычислений на системах с общей памятью.

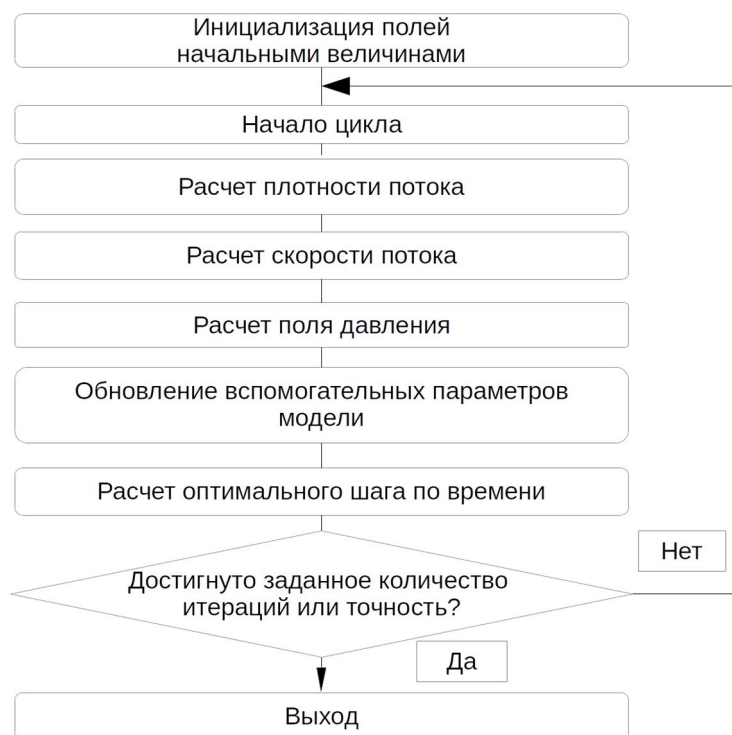


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма

Предпосылки для перехода между микро- и макроуровнями моделирования. В значительной части задач, связанных с разработкой и исследованием ИТС, отсутствует необходимость построения микроскопической модели каждого фрагмента дорожной сети. Интерес исследователей привлекают нештатные ситуации на дорожных сетях, например, такие, как выход из строя элементов коммуникационной компоненты ИТС на заданных участках дорожной сети для последующей оценки возможности и эффективности использования альтернативных средств передачи данных среди участников ИТС. В качестве альтернативных средств передачи данных могут использоваться одноранговые сети, «дублирующие» каналы передачи данных, вышедших из строя глобальных сетей передачи данных. Для проведения исследования нештатных ситуаций на фрагментах дорожных сетей достаточно описать изменения свойств потоков транспорта, прибывающих в исследуемую область и покидающих её. Для построения модели, отвечающей таким требованиям, в настоящей работе предложено использовать описанную выше континуальную модель. Дорожная сеть города или региона содержит значительное количество однотипных элементов: перекрёстки («крестовые» и Т-образные); примыкания дорог/съезды; прямые/изогнутые участки дорог и др. В настоящей работе предлагается описывать отдельные однотипные элементы дорожной сети с использованием континуальной модели и при необходимости переходить к микроскопическому описанию, реализованному в SUMO, обеспечив передачу параметров, характеризующих усреднённые свойства транспортных потоков, вычисленные в континуальной модели. Предлагаемый подход позволит значительно сократить время работы модели транспортной сети.

Постановка задачи вычислительного эксперимента. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны следующие типовые элементы дорожной сети: прямые отрезки длиной 500 и 5000 метров, Т-образный перекрёсток, на котором поток транспорта равномерно расходится в оба направления; съезд с дороги (перпендикулярный движению основного потока съезд направо), на котором с основной дороги съезжает 25 % автомобилей. На всех участках подразумевается однонаправленное движение транспорта, что не накладывает ограничений на построение модели с двусторонними дорогами, оставляя возможность проводить расчёт потока для каждого направления индивидуально. Модели указанных типовых элементов дорожной сети реализованы в SUMO и в предложенной континуальной модели. В процессе каждого вычислительного эксперимента фиксировалось реальное время выполнения моделирования для оценки целесообразности осуществления перехода между микро- и макроуровнями модели; оценивалась зависимость

времени работы модели от свойств потока транспорта на данном типовом элементе дорожной сети («плотность» машин).

При проведении эксперимента использовалась сборка SUMO версии 1.2.0. Модели одностипных фрагментов дорожных сетей последовательно реализовывались на компьютере, работающем под управлением операционной системы Debian GNU/Linux Buster 10. Компьютер был оснащён процессором Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz (4 потока, 2 ядра), памятью 4GB. Для изоляции ядра процессора от планировщика операционной системы был добавлен параметр ядра linux: isolcpus = 2,3, что позволило отключить потоки 3 и 4, относящиеся ко 2-му ядру процессора от ПОТОКА управления. При запуске программы моделирования использовалось свободное второе ядро процессора, через команду taskset: taskset -c 2 python expN.py. Указанные настройки позволили исключить влияние исполнения фоновых процессов на время исполнения экспериментов.

В модели SUMO время симуляции запрашивалось через модуль output, фиксировались выходная переменная "Duration", содержащая (реальное) время, прошедшее с запуска процесса симуляции на основе времени, выдаваемого таймером операционной системы. Модельное время, используемое для SUMO, составляло 14400 секунд для всех экспериментов.

В модели MFlow [8] время выполнения рассчитывалось через внешнюю команду time, которая вычисляет, сколько времени процесс моделирования использовал процессор в пользовательском режиме.

Для получения сопоставимых начальных условий в исследуемых микро- и макромоделях было принято предположение, что на момент начала эксперимента весь фрагмент исследуемой дороги равномерно заполнен транспортом. Указанное предположение позволяет считать, что с начала процесса моделирования учитывается взаимное влияние транспортных средств в микромоделю, что является «аналогией» трубы заполненной веществом в континуальной модели.

Характеристика результатов экспериментов. В первой серии экспериментов сравнивалось время выполнения вычислений для микро- и макромоделей, описывающих прямые участки дороги длиной 500 м (рис. 2) и 5000 м (рис. 3). Первый участок (500 м) соответствует среднему расстоянию между перекрёстками в современных городских новостройках, второе расстояние может соответствовать фрагменту шоссе. Результаты экспериментов и значительный разброс длин моделируемых участков позволяют отметить общую тенденцию в изменении времени вычислений для моделей. Дороги однонаправленные, микромодель описывает двухполосную дорогу. На рис. 2, 3 представлены зависимости времени выполнения моделирования от плотности потока автомобилей. По горизонтальной оси указан интервал в модельных шагах (интервал между шагами – 0,1 с модельного времени) SUMO появления нового автомобиля на дороге (1 автомобиль за 100 модельных шагов, за 40 шагов, и т.д.).

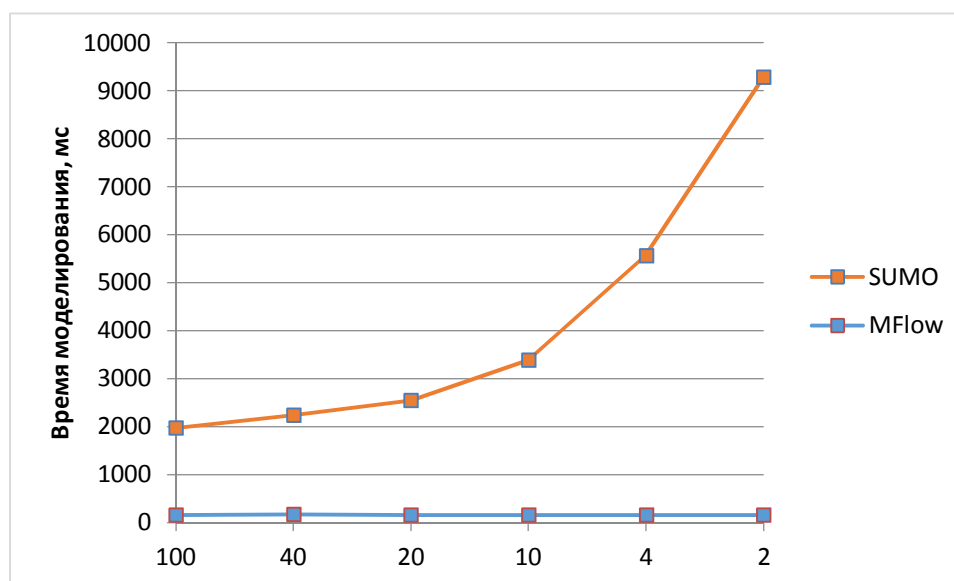


Рисунок 2 – Прямая двухполосная дорога длиной 500 м

Представленные на рисунке 2 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования прямого участка двухполосной дороги от 10 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 30 раз (новый автомобиль появляется каждые два модельных шага).

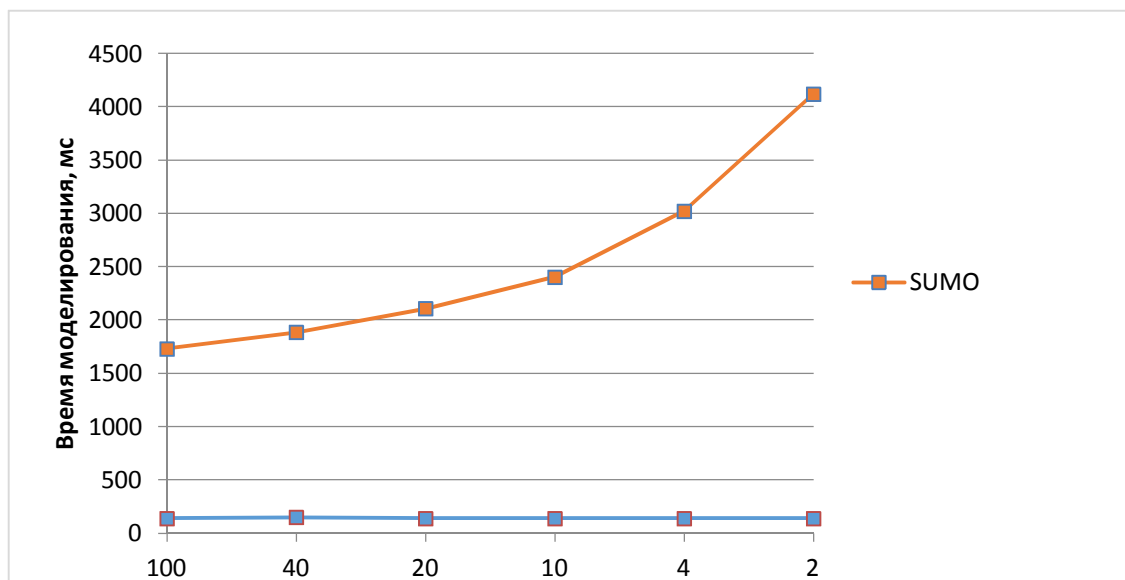


Рисунок 3 – Прямая двухполосная дорога длиной 5000 м

Аналогично, для длины участка 5000 м, как следует из рисунка 3, использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования прямого участка двухполосной дороги от 12 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 57 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

Представленные зависимости показывают значительный рост времени исполнения программы для микромоделей при увеличении интенсивности появления на дороге автомобилей от 1 шт. за 100 модельных шагов до 1 шт. за 2 модельных шага и практически константное значение для континуальной модели.

Во второй серии экспериментов изучаются такие же, как и для предыдущих экспериментов зависимости для Т-образных перекрестков. На рисунке 5 представлены результаты эксперимента для Т-образного перекрестка, на котором односторонний поток транспорта въезжает на перекресток по одной дороге и выезжает с перекрестка по двум оставшимся (поток «упирается» в прямоугольное разветвление и расходится вправо и влево на рисунке 4а) таким образом, что делится на перекрестке пополам.

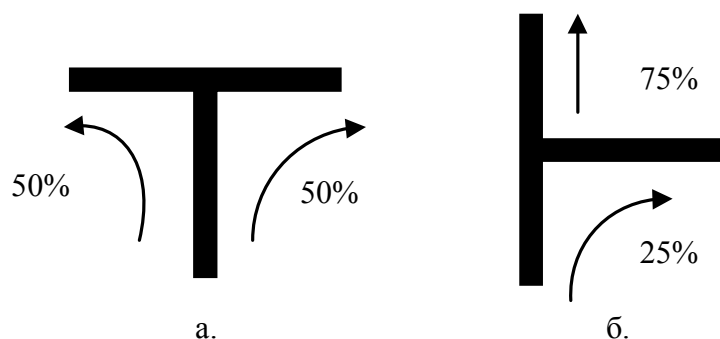


Рисунок 4 – Схемы движения транспорта на перекрестке

В указанном эксперименте длины каждого ответвления перекрестка приняты за 100 м.

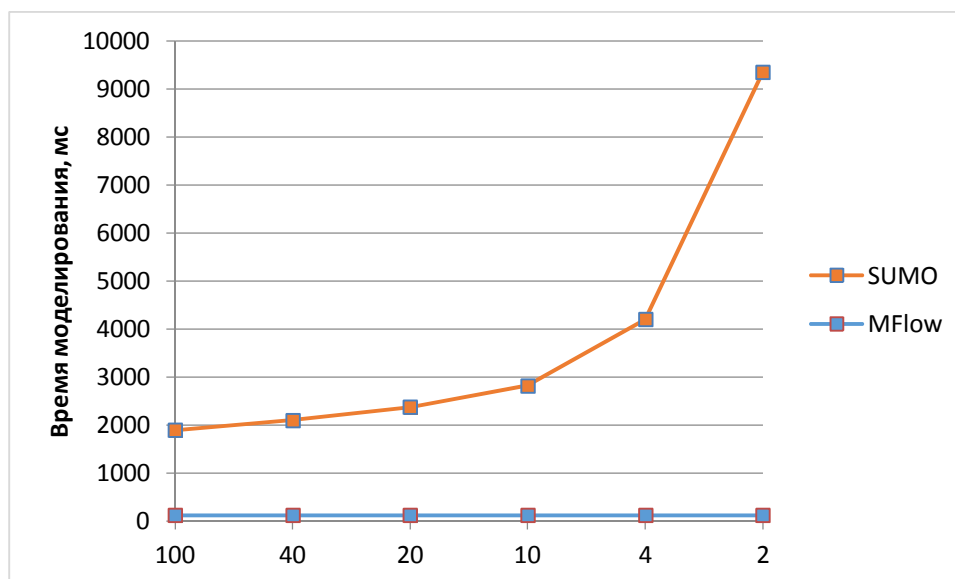


Рисунок 5 – Т-образный Перекресток

Представленные на рисунке 5 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования движения транспорта на Т-образном перекрёстке однополосных дорог от 15 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 77 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

На рисунке 6 представлены результаты эксперимента для Т-образного перекрёстка, описывающего съезд с дороги направо, расположенный под прямым углом к направлению основного потока однонаправленного движения. В указанный съезд попадает 25 % транспорта (рис. 4б). В этом эксперименте длины каждого ответвления перекрёстка были приняты за 100 м.

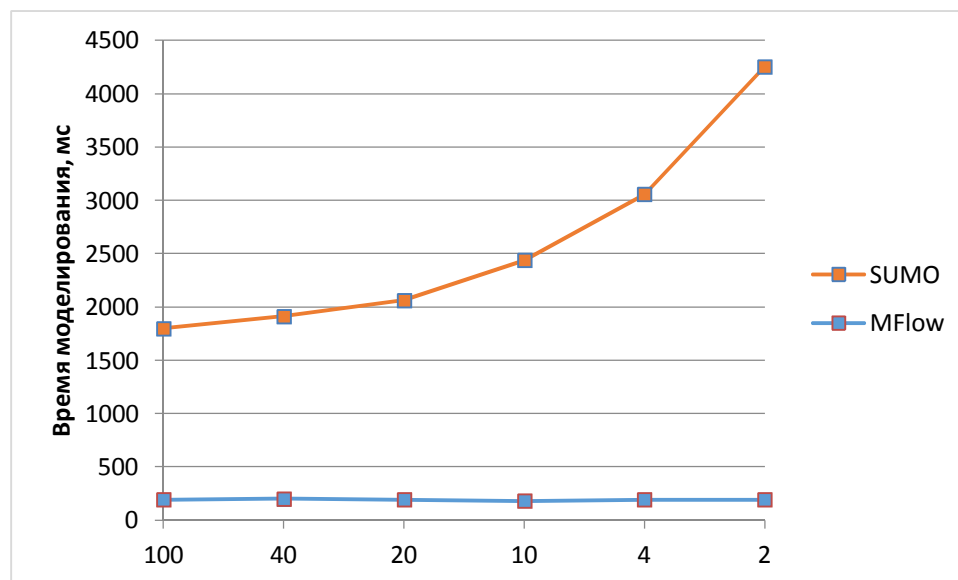


Рисунок 6 – Съезд с дороги направо

Представленные на рисунке 6 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования Т-образного перекрёстка однополосных дорог от 9 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 22 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

Заключение. В работе представлено сопоставление времен выполнения программы моделирования для симулятора SUMO, в котором реализована микроскопическая модель дорожного трафика, и кода MFlow, оперирующего континуальной моделью.

Континуальная модель позволяет сократить время выполнения моделирования отдельных фрагментов дорожной сети на порядок и более, что подтверждено представленными результатами вычислительных экспериментов. Ключевой особенностью использования оригинальной континуальной модели является близкое к константному время её исполнения для разных пространственных размеров объектов. Указанная особенность объясняется тем, что в предложенном решении используется фиксированный набор ячеек сетки, применяемой для выполнения расчёта усреднённых характеристик потока, и полностью отсутствует индивидуальное описание каждого участника дорожного движения.

На основе полученных данных можно сделать вывод о рациональности и перспективности разработки гибридной модели дорожного трафика. Сокращение времени выполнения моделирования в рамках гибридной модели обеспечивается за счёт передачи из микромодели усреднённых значений параметров транспортных потоков на входы типовых фрагментов дорожных сетей (прямые участки, перекрёстки и др.) в макромоделю. После чего производится вычисление усреднённых значений транспортных потоков на выходе типовых фрагментов при помощи макромодели, а также дальнейшее использование полученных значений для передачи их в микромоделю или для дальнейшего расчёта движения транспорта на типовых фрагментах в континуальной модели.

Библиографический список

1. Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский. – Москва : МФТИ, 2010. – 362 с.
2. Курц В. В. Солвер с кратными шагами, обеспечивающий контроль точности по скорости и дистанции / В. В. Курц, И. Е. Ануфриев // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 9 – С. 87–99.
3. Курц В. В. Быстрый алгоритм с кратными шагами для задачи моделирования транспортных потоков / В. В. Курц, И. Е. Ануфриев // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 5. – С. 124–134.
4. Лесько С. А. Разработка математического и программного обеспечения для моделирования и управления транспортными потоками на основе перколяционной стохастической модели / С. А. Лесько, А. С. Алёшкин, А. А. Барков // Конвергентные когнитивные информационные технологии : материалы II Международной научной конференции (Convergent 2017, Москва, Россия, 24–26 ноября 2017 г.). – Москва, 2017. – С. 454–469.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2006. – 395 с.
6. Об Основных направлениях и этапах реализации скоординированной (согласованной) транспортной политики государств – членов Евразийского экономического союза. Решение Высшего Евразийского экономического совета от 26 декабря 2016 года № 19. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456056120>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 05.07.2019).
7. Майоров Е. Р. Разработка микроскопической модели транспортных потоков города в системе SUMO / Е. Р. Майоров, И. Р. Лудан, Д. Д. Мотта, О. Н. Сапрыкин // Информационные технологии и нанотехнологии : материалы V Международной конференции и молодёжной школы (ИТНТ-2019). – 2019. – С. 743–747.
8. Чернышев А. С. Использование эйлерово-эйлеровского подхода для моделирования турбулентных течений пузырьковых сред / А. С. Чернышев, А. А. Шмидт // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 12. – С. 17–24.
9. Chuvatov M. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map / M. Chuvatov, V. Glazunov, L. Kurochkin, S. Popov // Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. – 2016. – Vol. 1. – P. 138–143.
10. Helbing D. Micro- and Macro- Simulation of Freeway Traffic / D. Helbing, A. Hennecke, V. Shvetsov, M. Treiber // Mathematical and Computer Modelling. – 2002. – Vol. 35. – P. 517–547.
11. Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations / D. Helbing // Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 53. – P. 2366–2381.
12. Lighthill M. J. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads / M. J. Lighthill and G. B. Whitham // Proceedings of the Royal Society of London A. – 1955. – Vol. 229. – P. 317–345.
13. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar. – McGraw-Hill : Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – P. 197.
14. Treiber M. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models / M. Treiber, A. Kesting, D. Helbing // Physica A. – 2006. – Vol. 360. – P. 71–88.
15. Treiber M. Modeling Lane-Changing Decisions with MOBIL / M. Treiber, A. Kesting // Traffic and Granular Flow'07. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2007. – P. 211–220.
16. Treiber M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Physical Review E. – 2000. – Vol. 62. – P. 1805–1824.
17. Versteeg H. K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. – 2nd ed. – UK : Pearson Education Limited, 2007.
18. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme / Van Leer B. // J. Comp. Phys. – 1974. – Vol. 14. – P. 361–370.

References

1. Gasnikov A. V., Klenov C. L., Nurminskiy E. A. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of traffic flows]. Moscow, MFTI, 2010. – 362 p.
2. Kurts V. V., Anufriev I. E. Solver s kratnymi shagami, obespechivayushchiy kontrol tochnosti po skorosti i distantsii [Multiple-step solver for controlling accuracy in speed and distance]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modelling], 2018, vol. 30, no. 9, pp. 87–99.
3. Kurts V. V., Anufriev I. E. Bystryy algoritm s kratnymi shagami dlya zadachi modelirovaniya transportnykh potokov [Fast algorithm with multiple steps for the task of modeling traffic flows]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modelling], 2016, vol. 28, no. 5, pp. 124–134.
4. Lesko S. A., Alyoshkin A. S., Barkov A. A. Razrabotka matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya modelirovaniya i upravleniya transportnymi potokami na osnove perkolyatsionnoy stokhasticheskoy modeli [Development of mathematical and software for modeling and traffic management based on a percolation stochastic model]. *Konvergentnye kognitivnye informatsionnye tekhnologii : materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Convergent cognitive information technologies : Materials of the II International Scientific Conference] (Convergent 2017, Moscow, Russia, 24–26 Nov., 2017). Moscow, 2017. – P. 454–469.
5. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 395 p.
6. *Ob Osnovnykh napravleniyakh i etapah realizatsii skoordinirovannoy (soglasovannoy) transportnoy politiki gosudarstv – chlenov Evraziyskogo ekonomicheskogo soyuza. Reshenie Vysshego Evraziyskogo ekonomicheskogo soveta ot 26 dekabrya 2016 goda № 19* [On the Main Directions and Stages of Implementing the Coordinated (Coordinated) Transport Policy of the Member States of the Eurasian Economic Union. Decision of the Supreme Eurasian Economic Council of December 26, 2016 No. 19]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456056120>.
7. Mayorov E. R., Ludan I. R., Motta D. D., Saprykin O. N. Razrabotka mikroskopicheskoy modeli transportnykh potokov goroda v sisteme SUMO [Development of a microscopic model of city traffic flows in the SUMO system]. *Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii : materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii i molodezhnoy shkoly (ITNT-2019)* [Information technologies and nanotechnologies : Proceedings of the V International Conference and Youth School (ITNT-2019)], 2019, pp. 743–747.
8. Chernyshev A. S., Shmidt A. A., Ispolzovanie eylerovo-eylerovskogo podhoda dlya modelirovaniya turbulentnykh techeniy puzyrkovykh sred [Using the Eulerian-Eulerian approach for modeling turbulent flows of bubble media]. *Pisma v ZhTF* [Letters to the PTF], 2013, vol. 39, no. 12, pp. 17–24.
9. Chuvatov M., Glazunov V., Kurochkin L., Popov S. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map. *Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2016, vol. 1, pp. 138–143.
10. Helbing D., Hennecke A., Shvetsov V., Treiber M. Micro- and Macro-Simulation of Freeway Traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, vol. 35, pp. 517–547.
11. Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations. *Phys. Rev. E.*, 1996, Vol. 53, pp. 2366–2381.
12. Lighthill M. J., Whitham, G. B. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1955, vol. 229, pp. 317–345.
13. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, p. 197.
14. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models, *Physica A.*, 2006, vol. 360, pp. 71–88.
15. Treiber M., Kesting A. Modeling Lane-Changing Decisions with MOBIL. *Traffic and Granular Flow '07*. Berlin ; Heidelberg, Springer, 2007, pp. 211–220.
16. Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 2000, vol. 62, pp. 1805–1824.
17. Versteeg H. K. and Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed., UK, Pearson Education Limited, 2007.
18. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *J. Comp. Phys.*, 1974, vol. 14, pp. 361–370.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.110-120

УДК 330.42, 339.133, 519.2, 004.942

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СПРОСА ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ПРЕДЛОЖЕНИИ ТОВАРА НА РЫНКЕ

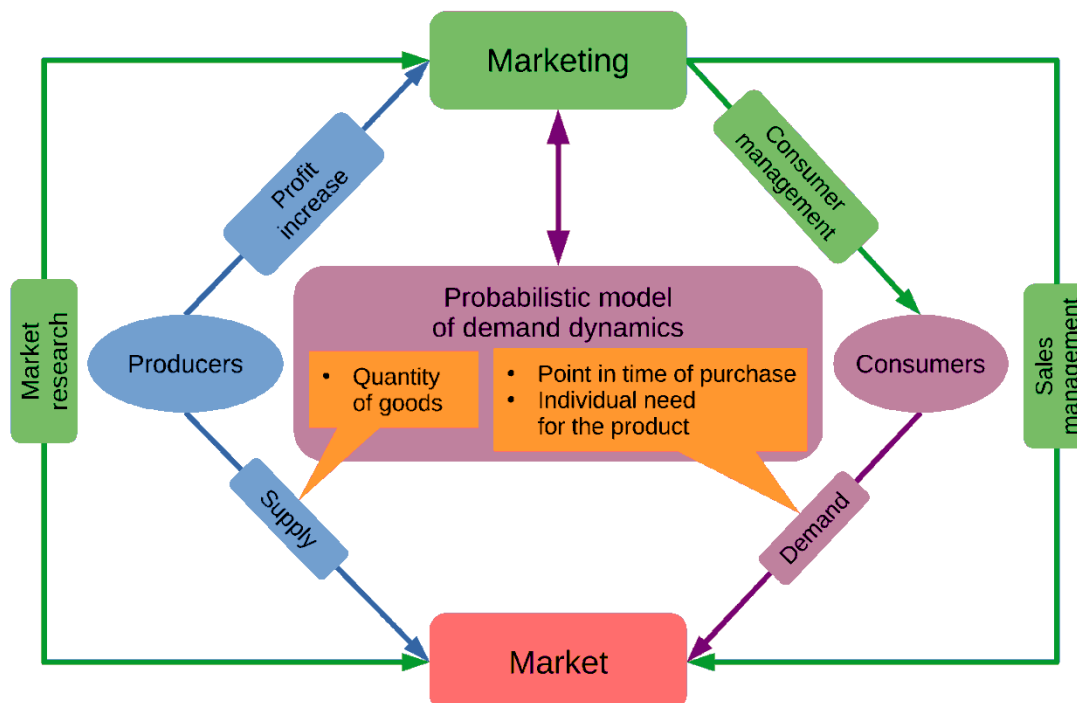
Статья получена редакцией 30.04.2019, в окончательном варианте – 21.11.2019.

Михеев Андрей Вячеславович, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: veehima@gmail.com

Построена вероятностная модель спроса на товар, количество которого на рынке ограничено. Новизна модели состоит в том, что математические ожидания спроса и интенсивности спроса представлены в ней в виде функционалов, определённых на множестве функций распределения вероятности экономических величин, описывающих взаимодействие производителей и потребителей на рынке товара. Показано, что стохастическая динамика спроса определяется двумя случайными величинами: моментами времени покупок товара и количеством товара, приобретаемого одним потребителем. Установлено, что временная зависимость спроса на товар представляет собой полином Бернштейна, аргументом которого является функция распределения моментов времени покупок товара, т.е. вероятность того, что момент покупки меньше или равен текущему моменту времени. Степень полинома определяется количеством потребителей на рынке, а коэффициенты полинома Бернштейна зависят от закона распределения количества товара, приобретаемого одним потребителем при условии, что предложение товара ограничено. Найдено аналитическое выражение для зависимости от времени интенсивности спроса (функции, определяющей кривую жизненного цикла товара) через аналогичные полиномы Бернштейна. Проведено численное моделирование найденных временных зависимостей для частных законов распределения указанных случайных величин. Исследовано влияние параметров этих законов распределения на жизненный цикл товара.

Ключевые слова: спрос, предложение, кривая жизненного цикла товара, дефицит товара, плотность распределения вероятности, функция распределения вероятности, математическое ожидание, полиномы Бернштейна

Графическая аннотация (Graphical annotation)



PROBABILISTIC MODEL OF THE DEMAND DYNAMICS
WITH FIXED SUPPLY OF GOODS ON THE MARKET

The article was received by the editorial board on 30.04.2019, in the final version – 21.11.2019.

Mikheev Andrey V., Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420015, Russian Federation,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: veehima@gmail.com

A probabilistic model of demand for goods, the amount of which in the market is limited, was developed. The novelty of the model is that the expected values of demand and demand intensity are presented in it in the form of functionals defined on the set of probability distribution functions of economic quantities that describe the interaction of producers and consumers in the product market. It is shown that, with fixed supply, stochastic demand dynamics is determined by two random variables: the points in time of purchase of goods and the number of units of goods purchased by one consumer. It was found that the time dependence of the demand for a product is a Bernstein polynomial, the argument of which is the cumulative distribution function of the moments of time of goods purchase, i.e. the probability that the moment of purchase is less than or equal to the current point in time. The degree of a polynomial is determined by the number of consumers in the market, and Bernstein coefficients depend on the law of distribution of the quantity of goods purchased by one consumer, provided that the supply of goods is limited. An analytical expression was found for the time dependence of the intensity of demand (the function defining the curve of the product life cycle) through similar Bernstein polynomials. For particular laws of the random variables distribution, a numerical simulation of the established time dependencies was carried out. The influence of the parameters of these distribution laws on the product life cycle was investigated.

Key words: demand, supply, product life cycle curve, shortage of goods, probability density function, cumulative distribution function, expected value, Bernstein polynomials

Введение. Существующие в настоящее время подходы к моделированию экономической и популяционной динамики основаны на таких разделах математики, как теория динамических систем, динамическое программирование, теория игр, теория марковских цепей, теория ветвящихся процессов и др. [2, 4, 6–8, 11, 12]. В большинстве случаев при построении моделей, описывающих эволюцию во времени некоторой экономической системы, предполагается, что эта система строго детерминирована. Её параметры не являются случайными величинами, и их динамика может быть найдена как решение либо разностного уравнения – для системы с дискретным временем, либо дифференциального уравнения (системы дифференциальных уравнений) – для системы с непрерывным временем [11]. Использование дифференциальных (разностных) уравнений в качестве инструмента математического моделирования экономической динамики обладает следующими достоинствами:

1. Все величины, входящие в такие уравнения, легко наделяются правдоподобным экономическим смыслом.
2. Для качественного и количественного анализа решений дифференциальных (разностных) уравнений может быть использован развитый математический аппарат теории динамических систем.
3. Анализ динамики параметров экономической системы на устойчивость к изменению начальных значений этих параметров выполнять достаточно просто.
4. Имеется возможность отыскания равновесных состояний экономической системы и оптимальных в некотором смысле траекторий её развития.

Предположение о детерминированности экономической системы является вполне приемлемым, если речь идёт о макроэкономике. Однако оно не вполне применимо к изначально стохастической динамике микроэкономических параметров [2]. Например, спрос и предложение на рынке товара формируются в результате полностью или частично несогласованного поведения на рынке большого числа потребителей и производителей товаров, причем в общем случае не только данного товара, но и тех, которые могут служить его заменителями. Поэтому динамика спроса и предложения будет стохастической в любой момент времени, а не только при определённом соотношении параметров нелинейной динамической системы, как в случае детерминированного хаоса [12]. Моделирование динамики спроса и предложения с помощью разностных или дифференциальных уравнений возможно и в этом случае. Однако в эти уравнения в качестве неизвестных функций должны входить не спрос и предложение, являющиеся случайными величинами, а их вероятностные характеристики: плотность распределения вероятности, математическое ожидание, начальные или центральные моменты, мода, медиана и др. При этом важно, чтобы существование таких уравнений имело строгие экономическое и математическое обоснования. Примерно так поступают при использовании теории марковских цепей для описания динамики экономических си-

стем: решением разностных и дифференциальных уравнений являются вероятности отдельных состояний экономической системы [4].

Существующие вероятностные модели в микроэкономике, опирающиеся на динамическое программирование, теории динамических систем и марковских цепей, обладают одним общим недостатком: в них явным образом, не учитываются такие простейшие случайные процессы, протекающие на рынке товара, как поставка товара на рынок и определение условий его продажи, принятие и реализация потребителем решения о покупке товара. В то же время взаимодействие именно этих процессов определяет как статику, так и динамику спроса, предложения, равновесной цены и других важнейших микроэкономических величин. Поэтому математическая модель, построенная как детальное вероятностное описание этого взаимодействия, была бы реалистичной и очень полезной для маркетинга. Пример такой модели можно найти в работе [5].

Один из создателей современной теории менеджмента Питер Друкер писал: «Цель маркетинга – сделать усилия по сбыту ненужными. Его цель – так хорошо познать и понять клиента, что товар или услуга будут точно подходить последнему и продавать себя сами» [3]. Как показано в [5], с вероятностной точки зрения «познать и понять клиента» – это значит определить в ходе статистического исследования рынка эмпирические законы распределения таких случайных величин, как покупательская способность потребителя; моменты времени совершения им покупок; количество товара, приобретаемого одним потребителем, и др. Чтобы эффективно пользоваться данной информацией для достижения главной цели маркетинга, необходимо установить связь этих законов распределения с функциями спроса, предложения, прибыли; определить их влияние на жизненный цикл товара. В [5] впервые было показано, как законы распределения случайных величин, определяющих рыночное поведение потребителей, формируют стохастическую динамику спроса и предложения. Однако в [5] предполагалось, что товара на рынке неограниченно много и исследовалась динамика равновесной рыночной цены на товар, а не спроса на него.

Целью настоящей работы является создание математической модели, позволяющей находить временную зависимость спроса и его интенсивности при ограниченном предложении товара на рынке, на основе вероятностного описания основных характеристик рыночной активности потребителей: моментов времени покупок товара и количества товара, приобретаемого одним потребителем.

Научная новизна работы заключается в последовательном вероятностном подходе к построению модели: экономические величины, характеризующие взаимодействие потребителей и производителей на рынке товара, считаются случайными и описываются с помощью функций (или плотностей) распределения вероятности. Временные зависимости математического ожидания спроса и интенсивности спроса на товар, следующие из построенной модели, являются функциями, определёнными на множестве этих функций распределения вероятности.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования построенной модели для управления динамикой реальных экономических систем: в функционалах спроса и интенсивности спроса на товар можно использовать эмпирические оценки функций распределения вероятности экономических величин, присущие конкретному рынку товара. Это позволит в ходе численного моделирования установить, как нужно изменять значения параметров этих функций распределения, чтобы добиться желаемого поведения потребителей, например, такого, которое увеличивает спрос на товар.

Общие положения вероятностной модели. Предположим, что на рынке некоторого товара имеется N_c потребителей, заинтересованных в его покупке. Количество товара на рынке ограничено и составляет N_g единиц. В момент времени $t = t_j^{(c)}$ j -й потребитель предполагает купить $n_j^{(c)}$ необходимых ему единиц товара. Здесь и далее $j = 1, 2, \dots, N_c$. Тактика поведения потребителя на рынке такова, что если $n_j^{(c)}$ больше количества товара, оставшегося на рынке к моменту времени $t = t_j^{(c)}$, то j -й потребитель покупает все остатки товара.

Чтобы не усложнять модель и вычленив влияние ограниченного количества товара на спрос и интенсивность спроса, будем считать, что все потребители располагают таким количеством денежных средств, которое позволяет им купить любое доступное на рынке количество товара. Таким образом, в отличие от [5], мы не будем учитывать покупательскую способность потребителей.

Для того чтобы установить динамику спроса на товар при условии, что его количество на рынке постепенно уменьшается, удобно перейти от моментов времени $t_j^{(c)}$ к упорядоченным по «неубыванию» моментам времени: $t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(N_c)}$. Таким образом, $t_{(j)}$ представляет собой j -ю порядко-

вую статистику для множества случайных моментов времени покупок товара. Количество товара, которое предполагает купить в момент времени $t_{(j)}$ один из потребителей, обозначим через n_j . Характер связи n_j с $n_j^{(c)}$ для определения динамики спроса не существен, так как n_j можно рассматривать как новую случайную величину, имеющую практически тот же смысл, что и $n_j^{(c)}$.

Будем считать, что поведение различных потребителей на рынке не является согласованным: потребитель при совершении покупки не учитывает опыт предшествующих покупок товара и не корректирует своё рыночное поведение, исходя из планов будущих покупок, имеющихся у других потребителей. Тогда случайные величины n_j и $t_j^{(c)}$ попарно независимы. Если также считать, что в основе рыночного поведения потребителей лежат одни и те же принципы, то законы распределения случайных величин n_j и $t_j^{(c)}$ будут одинаковы для всех потребителей товара, т.е. не будут зависеть от номера j . Обозначим плотность распределения вероятности случайной величины $t_j^{(c)}$ через $\varphi_c(x)$, а вероятности отдельных значений случайной величины n_j через $p_n(m) \equiv P(n_j = m)$, где m пробегает все возможные значения случайной величины n_j . Пусть $\varphi_j(x)$ – функция плотности распределения вероятности j -й порядковой статистики $t_{(j)}$. Тогда она связана с $\varphi_c(x)$ следующим образом [9]:

$$\varphi_j(x) = N_c C_{N_c-1}^{j-1} \varphi_c(x) \cdot (F_c(x))^{j-1} (1 - F_c(x))^{N_c-j}, \quad (1)$$

где $F_c(x) = \int_0^x \varphi_c(t) dt$ – интегральная функция распределения вероятности случайной величины $t_j^{(c)}$; $C_{N_c-1}^{j-1}$ – биномиальный коэффициент.

Зависимость от времени математического ожидания спроса и интенсивности спроса на товар. Пусть $Q_d(t)$ – совокупный спрос на товар в момент времени t . Тогда покупка товара в момент времени $t_{(j)}$ произойдёт только в том случае, если $N_g - Q_d(t_{(j-1)}) > 0$, т.е. если товар к моменту времени $t_{(j)}$ ещё не закончился. При этом количество товара, которое будет куплено в момент времени $t_{(j)}$, равно либо n_j при $n_j < N_g - Q_d(t_{(j-1)})$, либо $N_g - Q_d(t_{(j-1)})$ при $n_j \geq N_g - Q_d(t_{(j-1)})$. Таким образом, индивидуальный спрос в момент времени $t_{(j)}$ равен:

$$D_j = \min(n_j, N_g - Q_d(t_{(j-1)})) \cdot H(N_g - Q_d(t_{(j-1)}) > 0), \quad j = 1, 2, \dots, N_c, \quad (2)$$

где $H(A)$ – индикаторная функция: $H(A) = 1$, если утверждение A истинно и $H(A) = 0$, если утверждение A ложно; $t_{(0)} \equiv 0$ и $Q_d(0) = 0$, т.е. до момента времени $t = 0$ не было куплено ни одной единицы товара. Поскольку индивидуальный спрос в момент времени $t_{(j)}$ не равен нулю, только если $N_g - Q_d(t_{(j-1)}) > 0$, то во все предшествующие моменты времени $t_{(1)}, t_{(2)}, \dots, t_{(j-1)}$ потребители совершали покупки в соответствии с их потребностями. Следовательно, в уравнении (2) необходимо положить $Q_d(t_{(j-1)}) = \sum_{k=1}^{j-1} n_k$.

Учитывая, что совокупный спрос ΔQ_d на промежутке времени $[t; t + \Delta t]$ равен сумме тех индивидуальных спросов, для которых момент покупки товара принадлежит этому промежутку времени, находим:

$$\Delta Q_d = \sum_{j=1}^{N_c} D_j \cdot H(t \leq t_{(j)} \leq t + \Delta t). \quad (3)$$

Переход в уравнении (3) к пределу $\Delta t \rightarrow 0$ приводит нас к дифференциальному уравнению для мгновенного совокупного спроса $Q_d(t)$:

$$Q'_d(t) = \sum_{j=1}^{N_c} D_j \cdot \delta(t - t_{(j)}), \quad (4)$$

где $Q'_d(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta Q_d / \Delta t$ – производная по времени от функции спроса (интенсивность спроса в момент времени t); $\delta(t - t_{(j)}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} H(t \leq t_{(j)} \leq t + \Delta t) / \Delta t$ – дельта-функция Дирака.

Интегрируя по переменной t обе части равенства (4) и учитывая, что $Q_d(0) = 0$, находим временную зависимость мгновенного совокупного спроса на товар:

$$Q_d(t) = \sum_{j=1}^{N_c-1} S_j \cdot H(t_{(j)} \leq t < t_{(j+1)}) + S_{N_c} \cdot H(t \geq t_{(N_c)}), \quad (5)$$

где $S_j \equiv Q_d(t_{(j)}) = \sum_{k=1}^j D_k$ – совокупный спрос в момент времени $t_{(j)}$. Из формулы (2) следует, что члены последовательности S_j удовлетворяют рекуррентному уравнению $S_j = S_{j-1} + \min(n_j, N_g - S_{j-1})$ с граничным условием $S_0 = 0$. Решение этого рекуррентного уравнения при $n_j \geq 0$ имеет вид:

$$S_j = H(\sigma_j \leq N_g) \cdot \sigma_j + N_g \cdot (1 - H(\sigma_j \leq N_g)), \quad \sigma_j = \sum_{k=1}^j n_k, \quad j = 1, 2, \dots, N_c. \quad (6)$$

Пусть $F_n(x) = \sum_{m \leq x} p_n(m)$ – функция распределения случайной величины n_j , одинаковая для всех $j = 1, 2, \dots, N_c$. В силу сделанного ранее предположения о независимости случайных величин $n_1, n_2, \dots, n_j$ функция распределения $F_\sigma(j, x) = \sum_{m \leq x} p_\sigma(j, m)$ случайной величины σ_j представляет собой j -кратную свёртку функций распределения $F_n(x)$:

$$F_\sigma(j, x) = \underbrace{F_n(x) * F_n(x) * \dots * F_n(x)}_j, \quad F_n(x) * F_n(x) = \int_0^x F_n(x-y) dF_n(y), \quad (7)$$

где $p_\sigma(j, m) \equiv P(\sigma_j = m)$ – вероятности возможных значений m случайной величины σ_j .

Из уравнения (5) следует, что для нахождения математического ожидания совокупного спроса $\tilde{Q}_d(t) = E(Q_d(t))$, кроме законов распределения (1) и (7), необходима совместная плотность распределения порядковых статистик $t_{(j)}$ и $t_{(j+1)}$ [9]:

$$\varphi_{t_{(j)}, t_{(j+1)}}(x_1, x_2) = \frac{N_c! \varphi_c(x_1) \varphi_c(x_2)}{(j-1)!(N_c-j-1)!} (F_c(x_1))^{j-1} (1 - F_c(x_2))^{N_c-j-1} H(x_1 \leq x_2). \quad (8)$$

С помощью (1), (7), (8) из (5) и (6) находим зависимость от времени среднего совокупного спроса на товар:

$$\tilde{Q}_d(t) = \sum_{j=0}^{N_c} \tilde{S}_j \cdot C_{N_c}^j \cdot (F_c(t))^j (1 - F_c(t))^{N_c-j}, \quad (9)$$

$$\tilde{S}_j = E(S_j) = \sum_{m=0}^{N_g} m \cdot p_\sigma(j, m) + N_g \cdot \left(1 - \sum_{m=0}^{N_g} p_\sigma(j, m) \right), \quad j = 1, 2, \dots, N_c, \quad \tilde{S}_0 = 0. \quad (10)$$

Уравнение (9) определяет средний совокупный спрос в виде полинома Бернштейна функции $f(j) \equiv \tilde{S}_j$. При этом аргументом полинома Бернштейна является интегральная функция распределения вероятности $F_c(t)$ неупорядоченных моментов времени $t_j^{(c)}$, в которые потребители совершают покупки товара:

$$\tilde{Q}_d(t) = B_{N_c}^f(F_c(t)), \quad B_{N_c}^f(x) = \sum_{j=0}^{N_c} f(j) C_{N_c}^j x^j (1-x)^{N_c-j}. \quad (11)$$

Подробнее о свойствах и применениях полиномов Бернштейна можно прочесть в [10]. Поскольку полином Бернштейна, при стремлении его степени к бесконечности, равномерно сходится к функции, для которой он записан, то из (11) следует асимптотическое равенство:

$$\tilde{Q}_d(t) \sim k(N_c) f(F_c(t)), \quad N_c \rightarrow \infty. \quad (12)$$

Характер зависимости коэффициента пропорциональности $k(N_c)$ от количества потребителей N_c определяется видом функции $f(j)$.

Из уравнения (11) легко найти динамику средней интенсивности спроса (среднего числа покупок, совершаемых в единицу времени), когда количество товара на рынке ограничено. Используя хорошо известное выражение для производной от полинома Бернштейна, получаем:

$$\tilde{Q}_d'(t) = N_c \varphi_c(t) B_{N_c-1}^f(F_c(t)), \quad B_{N_c-1}^f(x) = \sum_{j=0}^{N_c-1} \Delta f(j) C_{N_c-1}^j x^j (1-x)^{N_c-1-j}, \quad (13)$$

где $\Delta f(j) \equiv \tilde{S}_{j+1} - \tilde{S}_j$ – средний индивидуальный спрос в момент времени $t_{(j+1)}$. С помощью (1) уравнению (13) можно придать следующий, более простой вид:

$$\tilde{Q}_d'(t) = \sum_{j=1}^{N_c} (\tilde{S}_j - \tilde{S}_{j-1}) \cdot \varphi_j(t). \quad (14)$$

Отметим, что уравнение (14) можно также получить, вычисляя математическое ожидание от обеих частей равенства (4). Как и в случае функции спроса, из (13) можно найти асимптотику средней интенсивности спроса при большом количестве потребителей на рынке:

$$\tilde{Q}_d'(t) \sim N_c K(N_c) \varphi_c(t) \Delta f(F_c(t)), \quad N_c \rightarrow \infty, \quad (15)$$

где $K(N_c)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида функции $\Delta f(j)$.

Зависимость от времени средней интенсивности спроса, определяемая уравнениями (13), (14), представляет собой одну из разновидностей функций, описывающих жизненный цикл товара на рынке [3]. График этой зависимости называется кривой жизненного цикла товара. Таким образом, кривая жизненного цикла товара определяется функцией, пропорциональной произведению полинома Бернштейна с аргументом $F_c(t)$, записанного для среднего индивидуального спроса $\tilde{S}_{j+1} - \tilde{S}_j$, на плотность распределения вероятностей $\varphi_c(t)$ неупорядоченных моментов времени, в которые совершаются покупки товара.

Динамика спроса и его интенсивности при отсутствии дефицита товара. Предположим, что товар не является дефицитным и каждый из N_c потребителей покупает столько единиц товара, сколько планировал купить. Это значит, что выполняется неравенство $\sigma_{N_c} \leq N_g$. В этом случае, как следует из (6), $S_j = \sigma_j$ при всех $j = 1, 2, \dots, N_c$. Следовательно,

$$\tilde{S}_j = E(\sigma_j) = E\left(\sum_{k=1}^j n_k\right) = \tilde{n} \cdot j, \quad \text{где } \tilde{n} = E(n_j) = \sum_m m \cdot p_n(m) - \text{математическое ожидание случайной}$$

величины n_j , т.е. среднее количество товара, приобретаемого одним потребителем. Уравнения (9)

и (14) при $\tilde{S}_j = \tilde{n} \cdot j$ приобретают вид:

$$\tilde{Q}_d'(t) = \tilde{n} N_c \varphi_c(t), \quad \tilde{Q}_d(t) = \tilde{n} N_c F_c(t). \quad (16)$$

Формулы (16) показывают, что при отсутствии дефицита товара зависимость от времени среднего спроса $\tilde{Q}_d(t)$ имеет форму функции распределения $F_c(t)$ неупорядоченных моментов времени, в которые потребители совершают покупки, а кривая жизненного цикла товара $\tilde{Q}_d'(t)$ повторяет форму плотности распределения вероятности $\varphi_c(t)$ этих моментов времени. В силу этого средний спрос $\tilde{Q}_d(t)$ является неубывающей функцией времени, график которой имеет вид кривой с насыщением: $\lim_{t \rightarrow +\infty} \tilde{Q}_d(t) = \tilde{n} N_c$ – количество товара, полностью удовлетворяющее потребность покупа-

телей в этом товаре. Таким образом, величина спроса ограничена сверху значением $\tilde{n}N_c$. После завершения продаж на рынке остаются нераспроданными в среднем $N_g - \tilde{n}N_c$ единиц товара.

Обычно на кривой жизненного цикла товара выделяют стадии роста, зрелости и упадка [3]. Как видно из уравнения (16), когда товар не дефицитен, длительность этих стадий целиком определяется покупательской активностью потребителей в разные промежутки времени. В некоторых случаях отдельные стадии могут отсутствовать на кривой жизненного цикла. Например, при равномерном распределении моментов времени $t_j^{(c)}$ функции $\varphi_c(t)$ и $F_c(t)$ имеют вид:

$$\varphi_c(t) = H(0 \leq t \leq T)/T, \quad F_c(t) = t \cdot H(0 \leq t \leq T)/T + H(t > T), \quad (17)$$

где T – период активности потребителей на рынке. При этом кривая жизненного цикла целиком состоит из одной стадии – стадии зрелости, длительность которой равна T . Равномерное распределение (17) означает, что товар хорошо знаком потребителю и пользуется у него устойчивым спросом. Поскольку товара на рынке много, потребители раскупают его с постоянной во времени интенсивностью до тех пор, пока полностью не удовлетворят свои потребности в этом товаре. Длительность стадий роста и упадка при этом равна нулю.

Динамика спроса и его интенсивности при дефиците товара на рынке. При наличии дефицита товара, т.е. при выполнении неравенства $N_g < \sigma_{N_c}$, временные зависимости функций спроса и жизненного цикла товара, определяемые уравнениями (9), (14), отличаются от простых зависимостей (16). Причём тем сильнее, чем больше товара не хватает на рынке. Изменения в (9), (14), по сравнению с (16), прежде всего касаются участков зрелости и упадка. Каким бы ни был закон распределения случайных величин n_j , т.е. для любых вероятностей $p_n(m)$, при дефиците товара на рынке, суммы в (9), (14) не содержат некоторое количество слагаемых с номерами вблизи $j = N_c$, которые как раз определяют длительность и форму стадий зрелости, упадка на кривых спроса и жизненного цикла товара. Характер изменений этих стадий существенно зависит от того, как распределено количество товара, планируемое к покупке одним потребителем. Однако, как следует из уравнений (9), (14), независимо от этого распределения, увеличение дефицита товара (увеличение разности $\sigma_{N_c} - N_g$) на рынке всегда уменьшает длительность жизненного цикла товара.

Проиллюстрируем сказанное на конкретных примерах. Предположим вначале, что количество товара, которое собирается приобрести один потребитель, имеет вырожденный (причинный) закон распределения:

$$p_n(m) = H(m = \tilde{n}), \quad p_\sigma(j, m) = H(m = j \cdot \tilde{n}), \quad j = 0, 1, \dots, N_c. \quad (18)$$

Закон распределения (18) означает, что все потребители планируют приобрести одно и то же количество товара, равное $\tilde{n}$: $n_j = \tilde{n}$, $\forall j$. Подстановка (18) в (10) приводит нас к следующему выражению для коэффициентов полинома Бернштейна:

$$\tilde{S}_j = j \cdot \tilde{n} \cdot H(j \leq N_g / \tilde{n}) + N_g \cdot H(j > N_g / \tilde{n}), \quad j = 0, 1, \dots, N_c. \quad (19)$$

Предполагая, что $N_c > N_g / \tilde{n}$ (дефицит товара на рынке), с помощью (19), (9) и (13) находим аналитические выражения для временной зависимости спроса и интенсивности спроса на товар:

$$\tilde{Q}_d(t) = \tilde{n} N_c F_c(t) I_{1-F_c(t)}(N_c - \lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor, \lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor) + N_g I_{F_c(t)}(\lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor + 1, N_c - \lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor), \quad (20)$$

$$\tilde{Q}'_d(t) = \tilde{n} N_c \varphi_c(t) \cdot (I_{1-F_c(t)}(N_c - \lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor, \lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor) + \{N_g / \tilde{n}\} \cdot b_{\lfloor N_g / \tilde{n} \rfloor, N_c-1}(F_c(t))), \quad (21)$$

где $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа x , т.е. ближайшее целое число, меньшее или равное x ; $\{x\} = x - \lfloor x \rfloor$ – дробная часть числа x ; $I_x(a, b) = B(x; a, b) / B(1; a, b)$ – регуляризованная неполная бета-функция;

$B(x; a, b) = \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$ – неполная бета-функция; $b_{m,s}(x) = C_s^m x^m (1-x)^{s-m}$ – базисный многочлен Бернштейна.

На рисунке 1 представлены кривые спроса и жизненного цикла товара, рассчитанные с помощью уравнений (20), (21), в случае, когда моменты покупок товара имеют равномерное распределение (17). Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные кривые при отсутствии дефицита товара (использовались формулы (16)). Из рисунка 1 следует, что при отсутствии дефицита товара кривая жизненного цикла действительно не имеет стадий роста и упадка. Наличие дефицита приводит к появлению стадии упадка и уменьшению длительности жизненного цикла товара: чем больше $\tilde{n}$, тем короче жизненный цикл. Следовательно, нехватка товара при его ограниченном

предложении вызывает уменьшение со временем интенсивности спроса на товар: по мере того как запасы товара на рынке заканчиваются, не все потребители оказываются способными удовлетворить свои потребности в нём в полной мере и вынуждены покупать его меньше, чем хотели бы.

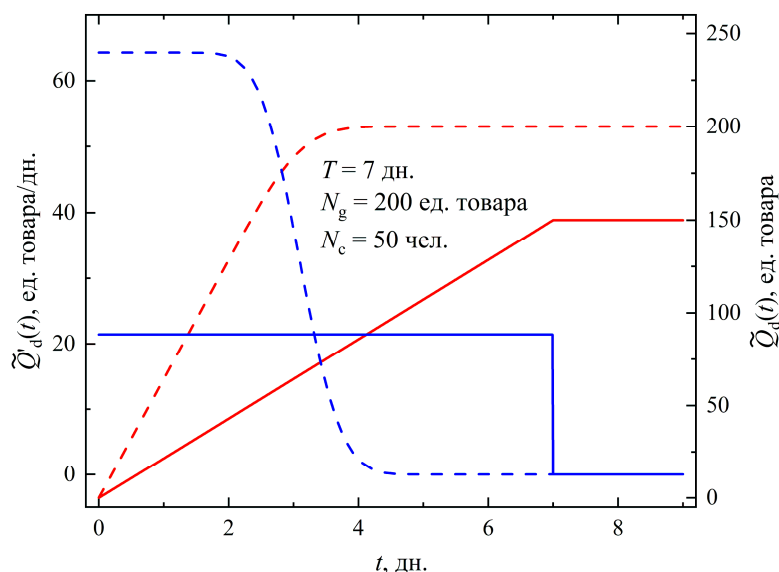


Рисунок 1 – Кривые спроса (красные линии, правая шкала) и жизненного цикла товара (синие линии, левая шкала), рассчитанные по формулам (16), (17), (20), (21). Для сплошных линий $\tilde{n} = 3$ (нет дефицита товара). Для пунктирных линий $\tilde{n} = 9$ (есть дефицит товара)

Из рисунка 1 также следует, что наличие дефицита товара меняет временную зависимость спроса не так радикально, как кривую жизненного цикла товара. Во всех случаях график функции спроса имеет вид логистической кривой с линейным нарастанием до стадии насыщения при отсутствии дефицита товара и нелинейным ростом при наличии дефицита товара. При этом увеличение $\tilde{n}$ ускоряет насыщение спроса.

Рассмотрим более сложный случай, чем представленный на рисунке 1. Предположим, что количество товара n_j , удовлетворяющее потребности j -го потребителя, имеет биномиальный закон распределения:

$$p_n(m) = C_M^m (\tilde{n}/M)^m (1 - \tilde{n}/M)^{M-m}, \quad m = 0, 1, \dots, M; \quad (22)$$

$$p_\sigma(j, l) = C_{j \cdot M}^l (\tilde{n}/M)^l (1 - \tilde{n}/M)^{j \cdot M - l}, \quad l = 0, 1, \dots, j \cdot M, \quad j = 0, 1, \dots, N_c, \quad (23)$$

где $\tilde{n}$ – среднее по ансамблю потребителей значение n_j ; M – наибольшее наблюдаемое значение n_j для данного рынка; $\tilde{n}/M$ – вероятность приобретения произвольным потребителем одной единицы товара. Коэффициенты Бернштейна (10) в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_j = j \times \tilde{n} \times H(j \leq N_g/M) + H(j > N_g/M) \times (j \cdot \tilde{n} \cdot I_{1-\tilde{n}/M}(j \cdot M - N_g, N_g) + \\ + N_g I_{\tilde{n}/M}(N_g + 1, j \cdot M - N_g)), \quad j = 0, 1, \dots, N_c. \end{aligned} \quad (24)$$

Из формул (22), (23) следует, что, во-первых, ни один потребитель не покупает больше M единиц товара, т.е. спрос на товар является ограниченным. Во-вторых, существует отличная от нуля вероятность того, что потребитель не купит ни одной единицы товара. Последнее обстоятельство сильно отличает потребителей, для которых справедливы законы распределения (22), (23), от потребителей, характеризующихся вырожденным законом распределения (18).

В качестве закона распределения моментов времени покупок $t_j^{(c)}$ будем использовать распределение Вейбулла:

$$\varphi_c(t) = H(t \geq 0) \alpha \cdot t^{\alpha-1} e^{-(t/T)^\alpha} / T^\alpha, \quad F_c(t) = H(t \geq 0) \left(1 - e^{-(t/T)^\alpha}\right). \quad (25)$$

Оно имеет простую экономическую интерпретацию. Разным значениям параметра формы α соответствуют различные виды покупательской активности потребителей на рынке. При $0 < \alpha < 1$

плотность распределения Вейбулла (25) сконцентрирована вблизи $t = 0$. Причём эта концентрация тем сильнее, чем ближе α к нулю. В этом случае периодом наибольшей активности потребителей на рынке являются первые моменты времени после начала продаж товара. Покупатели знают о поступлении товара на рынок, заинтересованы в приобретении товара и стараются купить его как можно быстрее. В пределе $\alpha \rightarrow +0$ спрос на товар становится ажиотажным при $t \approx 0$. При $\alpha > 1$ плотность распределения (25) концентрируется вблизи своей моды $t = T(1 - 1/\alpha)^{1/\alpha}$. Степень концентрации возрастает с ростом α . Это значит, что потребители либо не сразу узнают о поступлении товара на рынок, либо, зная о начале продаж товара, проявляют к нему интерес лишь спустя некоторое время. Во всех случаях с ростом времени они приобретают товар всё реже и реже. Спрос на товар становится ажиотажным при $t \approx T$, если $\alpha \rightarrow +\infty$. Наконец, при $\alpha = 1$ распределение Вейбулла (25) становится показательным распределением с параметром масштаба, равным T . Этот случай характеризуется наименьшей активностью потребителей на рынке среди всех возможных значений α : покупки товара начинаются сразу после поступления товара на рынок, но происходят не так интенсивно, как при $0 < \alpha < 1$. Товар хорошо знаком потребителям, но они не испытывают острой необходимости в его покупке. В течение всего времени продаж товара наблюдается лишь постепенное угасание интереса к нему потребителей. Следует ожидать, что среди всех значений α случай $\alpha = 1$ соответствует наибольшей длительности жизненного цикла товара.

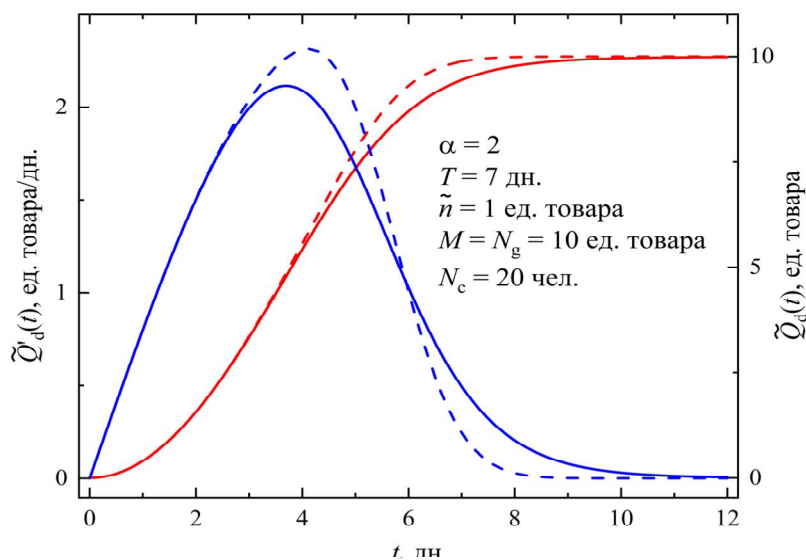


Рисунок 2 – Кривые спроса (красные линии, правая шкала) и жизненного цикла товара (синие линии, левая шкала). Сплошные линии найдены по формулам (9), (13), (22)–(25), причём n_j имеет биномиальное распределение. Пунктирные линии найдены по формулам (18), (20), (21), (25), причём n_j имеет вырожденное распределение

Рисунок 2 показывает, как меняются кривые спроса и жизненного цикла товара при переходе от неслучайной (18), (19) индивидуальной потребности в товаре к случайной (22)–(24). Как видим, этот переход увеличивает длительность жизненного цикла товара, уширяя зависимость от времени интенсивности спроса и затягивая выход на насыщение кривой спроса. Таким образом, если товар необходимо продать быстро и с наибольшей выгодой, то слишком большой разброс в значениях n_j у потребителей товара может помешать этим планам. В этом случае необходима определённая маркетинговая деятельность, направленная на выравнивание индивидуальных потребностей в товаре: нужно убедить потребителей с низким значением n_j покупать больше единиц товара. Это не только сузит закон распределения случайных величин n_j , но и увеличит среднюю индивидуальную потребность $\tilde{n}$ в товаре, что, как следует из рисунка 3а, уменьшит длительность жизненного цикла товара.

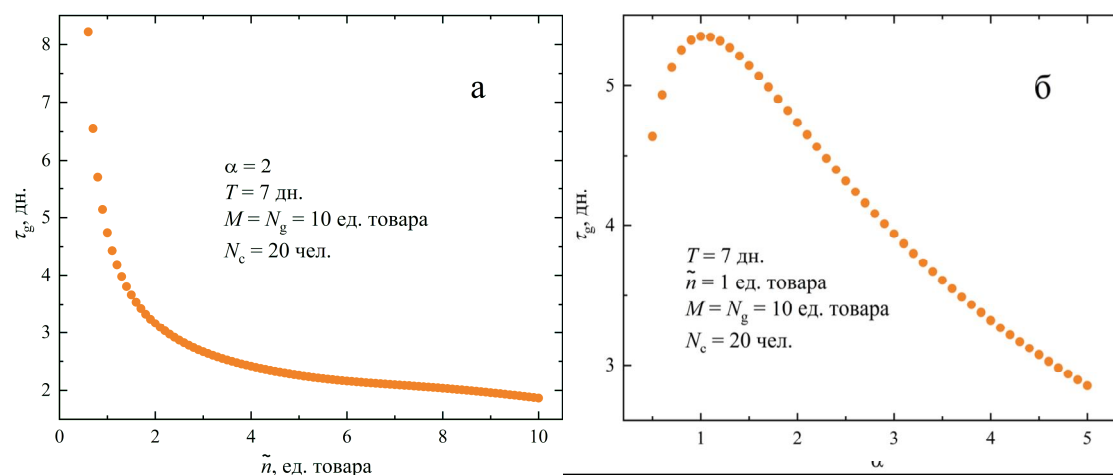


Рисунок 3 – Длительность жизненного цикла товара: а – в зависимости от среднего количества товара, приобретаемого одним потребителем; б – в зависимости от параметра α закона распределения (25) моментов времени покупательской активности потребителей. Длительность τ_g определялась как время, за которое спрос (9), (22)–(25) возрастает от 10 до 90 % своего максимального значения

Из рисунков 1 и 2 следует, что даже при наличии дефицита товара в первые моменты времени после начала продаж кривые спроса и жизненного цикла товара мало отличаются от графиков функций (16). Следовательно, в этом временном интервале интенсивность продаж определяется почти исключительно тем, каков закон распределения моментов времени $t_j^{(c)}$ потребительской активности на рынке. Поэтому для маркетинга изменение этого закона распределения – главный инструмент влияния на динамику интенсивности продаж. В подтверждение этих положений на рисунке 3б показано, как изменяется длительность жизненного цикла τ_g товара при изменении закона распределения моментов времени $t_j^{(c)}$. Хорошо видно, что в полном согласии со сделанным ранее предположением длительность τ_g максимальна при $\alpha = 1$, т.е. при минимальной потребительской активности на рынке.

Заключение. Предложенная в данной работе вероятностная модель спроса и жизненного цикла товара, концентрированным выражением которой являются формулы (9)–(16), (20), (21), устанавливает связь вероятностных характеристик поведения потребителей на рынке со стохастической динамикой интенсивности и объемов продаж товара, количество которого на рынке ограничено. По словам Билла Гейтса, «*знание – главный инструмент управления*». По этой причине соотношения, подобные (9)–(16), (20), (21), имеют большое значение для маркетинга, так как дают знание механизмов влияния вероятностных характеристик рыночного поведения потребителей на динамику спроса. Если маркетолог располагает эмпирическими оценками законов распределения случайных величин $t_j^{(c)}$ и n_j , найденными в ходе стандартного статистического исследования конкретного рынка товара, то формулы (9)–(16), (20), (21) позволят ему эффективно управлять потребительским поведением, воздействуя на параметры этих законов распределения, с целью увеличения как спроса, так и интенсивности спроса на товар. Конечной целью такого эффективного управления является извлечение максимально возможной прибыли из продажи данного товара.

Отметим, что если случайной величине $t_j^{(c)}$ придать смысл момента времени, в который происходит увеличение численности некоторой популяции на величину $n_j^{(c)}$, то $Q_d(t)$ – это прирост численности популяции на промежутке времени $[0; t]$. При такой интерпретации формулы (9)–(12), (16) и (20) становятся вероятностными моделями, описывающими динамику среднего прироста численности популяции при условии, что прирост ограничен сверху величиной N_g , т.е. эти формулы определяют целый класс функций, подобных логистической функции, являющейся решением уравнения Ферхюльста. Таким образом, построенная в настоящей работе вероятностная модель пригодна для использования не только в экономической, но и в популяционной динамике.

Библиографический список

1. Варшавский Л. Е. Моделирование динамики экономических систем с неопределенными параметрами / Л. Е. Варшавский // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 261–276. – DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-2-261-276.
2. Клебанова Т. С. Моделирование экономической динамики : учеб. пос. / Т. С. Клебанова, Н. А. Дубровина, О. Ю. Полякова, Е. В. Раевнева, А. В. Милов, Е. А. Сергиенко. – 2-е изд., стереотип. – Харьков : Издательский дом «ИНЖЭК», 2005. – 244 с.
3. Котлер Ф. Основы маркетинга / Ф. Котлер, Г. Армстронг. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1200 с.
4. Лабскер Л. Г. Вероятностное моделирование в финансово-экономической области / Л. Г. Лабскер. – Москва : Альпина Паблшер, 2002. – 224 с.
5. Михеев А. В. Вероятностный подход к математическому описанию рыночного равновесия / А. В. Михеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 4. – С. 90–98. – DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-90-98.
6. Осипенко Г. С. Динамика спроса и предложения / Г. С. Осипенко, Е. К. Ершов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2013. – № 3. – С. 235–247.
7. Caginalp C. Stochastic asset price dynamics and volatility using a symmetric supply and demand price equation / Carey Caginalp, Gunduz Caginalp // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2019. – Vol. 523. – P. 807–824. – DOI: 10.1016/j.physa.2019.02.049
8. Cyrus Chu C. Y. Population Dynamics: A New Economic Approach / C. Y. Cyrus Chu. – New York ; Oxford : Oxford University Press, 1998. – 240 p.
9. David H. A. Order Statistics / H. A. David, H. N. Nagaraja. – New York : John Wiley & Sons, 2003. – 458 p.
10. Lorentz G. G. Bernstein polynomials / G. G. Lorentz. – New York : Chelsea Publishing Company, 1986. – 134 p.
11. Shone R. Economic Dynamics: Phase Diagrams and their Economic Application / Ronald Shone. – Cambridge : Cambridge University Press, 2002. – 708 p.
12. Zhang W.-B. Discrete Dynamical Systems, Bifurcations, and Chaos in Economics / Wei-Bin Zhang. – Boston : Elsevier Science, 2006. – 460 p.

References

1. Varshavskiy L. E. Modelirovanie dinamiki ekonomicheskikh sistem s neopredelennymi parametrami [Uncertainty factor in modeling dynamics of economic systems]. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer Research and Modeling], 2018, vol. 10, no 2, pp. 261–276. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-2-261-276.
2. Klebanova T. S., Dubrovina N. A., Polyakova O. Yu., Raevneva E. V., Milov A. V., Sergienko E. A. *Modelirovanie ekonomicheskoy dinamiki : uchebnoe posobie* [Modeling economic dynamics : tutorial]. 2nd ed., stereotype. Kharkov, Publishing House "INZHEK", 2005. 244 p.
3. Kotler P., Armstrong G. *Osnovy marketinga* [Principles of Marketing]. Moscow, "Vilyams" Publishing House, 2003. 1200 p.
4. Labsker L.G. *Veroyatnostnoe modelirovanie v finansovo-ekonomicheskoy oblasti* [Probabilistic modeling in the financial and economic fields]. Moscow, Alpina Publisher, 2002. 224 p.
5. Mikheev A. V. Veroyatnostnyy podkhod k matematicheskomu opisaniyu rynochnogo ravnovesiya [Probabilistic Approach to Mathematical Description of Market Equilibrium]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics], 2018, no 4, pp. 90–98. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-90-98.
6. Osipenko G. S., Ershov E. K. Dinamika sprosa i predlozheniya [Demand and Supply Dynamics]. *Differentsialnye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential Equations and Control Processes], 2013, no 3, pp. 235–247.
7. Caginalp C., Caginalp G. Stochastic asset price dynamics and volatility using a symmetric supply and demand price equation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 523, pp. 807–824. DOI: 10.1016/j.physa.2019.02.049.
8. Cyrus Chu C. Y. *Population Dynamics: A New Economic Approach*. New York ; Oxford, Oxford University Press, 1998. 240 p.
9. David H. A., Nagaraja H. N. *Order Statistics*. New York, John Wiley & Sons, 2003. 458 p.
10. Lorentz G.G. *Bernstein polynomials*. New York, Chelsea Publishing Company, 1986. 134 p.
11. Shone R. *Economic Dynamics: Phase Diagrams and their Economic Application*. Cambridge, Cambridge University Press, 2002. 708 p.
12. Zhang W.-B. *Discrete Dynamical Systems, Bifurcations, and Chaos in Economics*. Boston, Elsevier Science, 2006. 460 p.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.121-127
УДК 004.056

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ИНКАПСУЛЯЦИИ КЛЮЧЕЙ ПОСТКВАНТОВЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Статья поступила в редакцию 18.11.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

Власенко Александра Владимировна, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерных технологий и информационной безопасности Института информационных технологий и безопасности, e-mail: Vlasenko@kubstu.ru

Евсюков Михаил Витальевич, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
студент, e-mail: michael.evsyukov@gmail.com

Путято Михаил Михайлович, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
кандидат технических наук, доцент, 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, e-mail: msanya@yandex.ru

Стремительный прогресс в исследовании и построении квантовых компьютеров приводит к необходимости замены уже в ближайшем будущем используемых алгоритмов асимметричной криптографии на те, которые способны обеспечить устойчивость к квантовому криптоанализу. Учитывая, что внедрение таких алгоритмов обещает занять продолжительное время, неотложным становится вопрос утверждения постквантовых стандартов. Однако задача выбора алгоритмов на их роль значительно осложняется неоднородностью математической природы постквантовых криптосистем. Нередко сравнение двух алгоритмов по разным критериям может приводить к противоположным результатам оценки. В связи с этим в статье предлагается единая система критериев оценки постквантовых механизмов инкапсуляции симметричного ключа. Её задача – привести известные свойства каждой криптосистемы, связанные с безопасностью, производительностью и гибкостью к такой форме, которая позволяет провести объективное сравнение алгоритмов между собой. Указанная система критериев была применена для анализа алгоритмов-кандидатов на роль постквантового стандарта механизма инкапсуляции ключей, прошедших во второй тур конкурса NIST. В ходе анализа удалось не только выделить алгоритмы, использование которых на данный момент представляется наиболее предпочтительным, но также сформулировать некоторые рекомендации, направленные на повышение эффективности дальнейшего анализа алгоритмов. В частности, перечислены наборы алгоритмов, которые, может быть, целесообразно объединить. Кроме того, на основе проведенного анализа раскрыт характер взаимных зависимостей между группами критериев оценки алгоритмов. Используемый набор критериев и подход к сравнению методов инкапсуляции ключей могут быть легко адаптированы для проведения аналогичного анализа кандидатов на роль постквантового стандарта электронной цифровой подписи или алгоритма шифрования.

Ключевые слова: квантовый компьютер, шифрование, защита информации, асимметричная криптография, криптоанализ, анализ, кибербезопасность, гибридные криптосистемы

RESEARCH OF KEY ENCAPSULATION MECHANISMS BASED ON POSTQUANTUM CRYPTOGRAPHIC ALGORITHMS

The article was received by the editorial board on 18.11.2019, in the final version 25.11.2019.

Vlasenko Alexandra V., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Computer Technologies and Information Security of the Institute of Information Technology and Security, e-mail: Vlasenko@kubstu.ru

Evsyukov Michael V., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,
student, e-mail: michael.evsyukov@gmail.com

Putyato Michael M., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: putyato.m@gmail.com

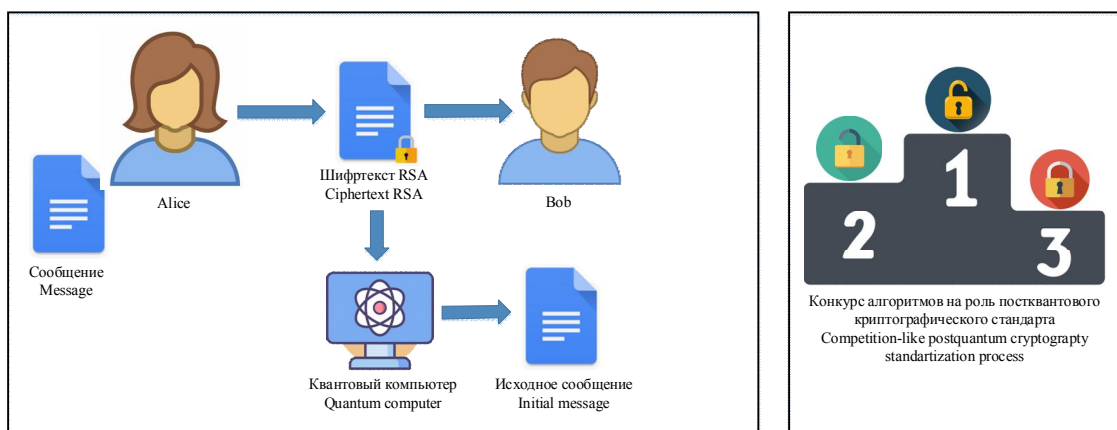
Makaryan Alexander S., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: msanya@yandex.ru

Rapid progress in the study and construction of quantum computers leads to the need of quick replacement of the current asymmetric cryptography algorithms with those that are capable of providing resistance to quantum cryptanalysis. Since their implementation is certain to take a long time, the approval of post-quantum standards becomes an urgent issue. However, the task of choosing algorithms to serve as standards is significantly complicated by heterogeneity of the mathematical nature of post-quantum cryptosystems. A comparison of two algorithms by different criteria can often lead to opposing evaluation results. In this regard, the article proposes a unified system of criteria for evaluating the post-quantum key encapsulation mechanisms. Its purpose is to bring each cryptosystem's properties related to security, performance and flexibility to a form that allows an objective comparison of algorithms. The specified system of criteria was used to analyze candidate algorithms for the role of the post-quantum key encapsulation mechanism standard that have passed to the second round of the NIST contest. During the analysis, it was possible not only to identify the algorithms, the use of which, at the moment, seems to be the most preferable, but also to formulate some recommendations aimed at improving the efficiency of further analysis of the algorithms. In particular, sets of algorithms that may be appropriate to combine into one were listed. In addition, based on the analysis, the nature of the mutual dependencies between the groups of criteria for evaluating the algorithms is revealed. The set of criteria used and the approach to comparing key encapsulation methods can be easily adapted for a similar analysis of candidates for the role of a post-quantum standard for digital signature or encryption algorithm.

Key words: quantum computer, encryption, information security, asymmetric quantum-resistant cryptography, cryptanalysis, analysis, cyber security

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Введение. В последние годы всё заметнее становятся успехи в области исследования и производства квантовых компьютеров – вычислительных устройств, использующих квантовые явления «запутанности» и неопределённости для повышения эффективности обработки данных. Благодаря реализации принципиально новых вычислительных механизмов, при решении определённых типов задач они демонстрируют экспоненциально более высокую производительность по сравнению с классическими компьютерами.

Одним из важнейших примеров превосходства квантового компьютера является алгоритм Шора, позволяющий решать такие математические задачи, как дискретное логарифмирование, факторизация и дискретное логарифмирование в группе точек эллиптической кривой с полиномиальной сложностью [6], в то время как их расчёт на классическом компьютере, при правильно подобранных параметрах, может занимать десятилетия. Поскольку именно вычислительная сложность этих задач обеспечивает безопасность современных криптосистем с открытым ключом, с практической точки зрения это означает их абсолютную неспособность противостоять криптоаналитическим атакам, которые задействуют квантовый компьютер.

Появление данной угрозы привело к необходимости разработки новых криптографических систем с открытым ключом. Оценивается, что полноценный квантовый компьютер будет создан в течение ближайших 20 лет [3]. Это означает, что внедрение криптографии нового поколения – более срочная задача, чем перевод асимметричных криптосистем на ключи большей длины, который должен

периодически происходить ввиду эволюционного развития классических вычислительных устройств. Данный факт, а также предполагаемая длительность перехода на постквантовую криптографию и возможность записи трафика злоумышленником для последующего расшифрования делают разработку и использование новых стандартов и технологий еще более актуальными, чем раньше.

К постквантовым криптосистемам предъявляется большой набор сложно выполнимых требований. Они должны не только надёжно защищать информацию от всевозможных методов классического и квантового криптоанализа, но и быть совместимыми с существующими протоколами и приложениями, поскольку необходимость их основательного перестроения, деградация скорости работы или повышение ресурсоёмкости как следствие внедрения новых криптосистем крайне нежелательны.

В связи с этим NIST (Национальный институт стандартов и технологий США) инициализировал процесс выбора алгоритмов на роль постквантовых криптографических стандартов электронно-цифровой подписи, алгоритма асимметричного шифрования (ААШ) и механизма инкапсуляции ключей (МИК). Для каждого из этих механизмов планируется выбрать как минимум по одному алгоритму [7].

Стандарты NIST имеют определяющее значение для криптографии во всём мире, поскольку многие зарубежные и международные организации, включая крупные банки и удостоверяющие центры, используют криптографические алгоритмы, стандартизованные NIST.

Тем не менее существует ряд причин, усложняющих процесс стандартизации:

- 1) требования к асимметричным криптосистемам и цифровым подписям сложнее, чем к симметричным алгоритмам и алгоритмам хеширования;
- 2) недостаток научного понимания ожидаемой мощности квантового компьютера;
- 3) математическое обеспечение и принципы работы некоторых алгоритмов задают разные свойства и параметры их функционирования, в связи с этим отсутствует возможность их прямого сравнения.

Вследствие этого NIST активно использует поддержку научного сообщества в процессе разработки критериев и оценке алгоритмов. В результате на конкурс потенциальных постквантовых стандартов было подано 82 заявки, из которых 69 удовлетворили основным требованиям NIST и были допущены в первый тур. В это же время на конкурс AES было подано 15 заявок, а на конкурс SHA-3 – 51.

В ходе первого тура 5 заявок были отозваны заявителями, 16 – взломаны или успешно атакованы, 13 – не смогли предоставить достаточно убедительного доказательства безопасности, некоторые похожие заявки были объединены. В итоге 26 кандидатов, 17 из которых – алгоритмы асимметричного шифрования и инкапсуляции ключей, а 9 – схемы цифровой подписи, успешно прошли во второй тур [4].

Во втором туре NIST уделяет больше внимания производительности программных и аппаратных реализаций, а также тому, как алгоритмы проявляют себя при работе в ограниченных устройствах. Эти сведения необходимы для определения кандидатов, которые лучше всего пригодны для использования в существующих приложениях и протоколах.

NIST рассчитывает получить черновой вариант стандарта в 2022 г., но оставляет за собой право на перенос срока. Вероятно, потребуется проведение третьего тура [4].

Определение критериев оценки механизмов инкапсуляции ключей. Для всестороннего и объективного анализа криптографических алгоритмов необходимо выделить набор критериев и определить их важность по сравнению друг с другом.

NIST объединяет требования, предъявляемые к алгоритмам, в три группы критериев [7]:

1. Безопасность.

1а. Изученность – изученность математической задачи, вычислительная сложность решения которой обеспечивает надёжность криптосистемы. Характеристика отражает временной срок, на протяжении которого математический аппарат, используемый криптосистемой, изучается в качестве механизма обеспечения криптографической стойкости: задача, предложенная более 20 лет назад; задача, предложенная более 10 лет назад; задачи, предложенные менее 10 лет назад.

1б. Доказательство – убедительность теоретического обоснования надёжности схемы. Качество доказательства криптографической стойкости алгоритма вносит не меньший вклад в обеспечение уверенности в безопасности криптосистемы, чем выбор математического аппарата: одно из наиболее убедительных доказательств; доказательство не содержит суждений, которые оцениваются экспертами NIST как сомнительные; доказательство содержит суждения, истинность которых не вызывает у экспертов NIST полной уверенности.

1с. Устойчивость МИК – тип криптоаналитических атак, к которым устойчив МИК: устойчивость к атакам на основе подобранных шифртекста (ССА); устойчивость к атакам на основе подобранных открытого текста (СРА).

1d. Устойчивость ААШ – тип криптоаналитических атак, к которым устойчив ААШ, связанный с МИК: устойчивость к атакам на основе подобранных шифртекста (ССА); устойчивость к атакам на основе подобранных открытого текста (ССА); не обозначена возможность применения алгоритма в качестве ААШ.

2. Ресурсоёмкость.

2a. Размер открытого ключа: менее 550 байт; от 550 до 1600 байт; от 1600 байт до 10000 байт; более 10000 байт.

2b. Размер шифртекста: менее 550 байт; от 550 до 1600 байт; от 1600 байт до 5000 байт; более 5000 байт.

2с. Производительность инкапсуляции – вычислительная эффективность операции зашифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора: менее 400 тысяч циклов работы процессора; от 400 до 1600 тысяч циклов работы процессора; от 1600 до 10000 тысяч циклов работы процессора; более 10000 тысяч циклов работы процессора.

2d. Производительность декапсуляции – вычислительная эффективность операции расшифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора: менее 400 тысяч циклов работы процессора; от 400 до 1600 тысяч циклов работы процессора; от 1600 до 10000 тысяч циклов работы процессора; более 10000 тысяч циклов работы процессора.

2е. Производительность генерации пары ключей – вычислительная эффективность операции расшифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора: менее 600 тысяч циклов работы процессора; от 600 до 2500 тысяч циклов работы процессора; от 2500 до 10000 тысяч циклов работы процессора; более 10000 тысяч циклов работы процессора.

2f. Возможность некорректной декапсуляции – способность алгоритма при правильном применении производить шифртексты, которые не могут быть декапсулированы: отсутствует; присутствует.

3. Гибкость.

3a. Гибкость МИК – возможность использования МИК в различных сценариях применения: предусмотрены СРА- и ССА-устойчивые версии МИК; предусмотрена только ССА-устойчивая версия МИК.

3b. Гибкость ААШ – возможность использования ААШ, связанной с МИК, в различных сценариях применения: предусмотрены СРА- и ССА-устойчивые версии ААШ; предусмотрена ССА-устойчивая версия ААШ; не предусмотрена возможность использования алгоритма в качестве ССА-устойчивой ААШ.

3с. Особенности алгоритма – гибкой называют криптосистему, которая предоставляет пользователю возможность достижения оптимального компромисса между показателями ресурсоёмкости и безопасности путём настройки параметров.

Анализ механизмов инкапсуляции ключей второго тура конкурса NIST. Кандидаты рассмотрены по состоянию на момент предоставления в NIST первых корректив, которые NIST и научное сообщество предлагали им внести в заявки по результатам первого тура (крайний срок для их подачи был 31 мая 2019 г.).

На основании приведённого списка критериев оценки МИК представим анализ МИК, прошедших во второй тур конкурса NIST в форме таблицы.

В результате сравнения можно сделать вывод о том, что криптосистемы с высокой итоговой оценкой в одной группе критериев могут находиться близко к нижней границе оценочной шкалы в другой группе.

Например, МИК Classic McEllice и NTS-КЕМ основаны на криптосистеме Мак-Элиса, разработанной в 1978 г., поэтому они более качественно изучены, чем остальные кандидаты [1]. Тем не менее большая длина открытого ключа этих алгоритмов ставит под сомнение возможность их эффективного использования в современных приложениях и протоколах.

В то же время при поиске способов обеспечения более сбалансированных показателей производительности создателям криптосистемы неизбежно приходится модифицировать её математический аппарат. Внесение изменений способно привести к существенному упрощению задачи, вычислительная сложность решения которой обеспечивает безопасность алгоритма. На примере двух МИК, основанных на решётках: FrodoKEM и LAC, из анализа видно, что LAC имеет более высокую итоговую оценку производительности по сравнению с FrodoKEM. Это обусловлено тем, что LAC использует менее консервативный математический аппарат, чем FrodoKEM, а именно структурированные решётки. В то время как FrodoKEM оценивается экспертами NIST как один из са-

мых безопасных кандидатов [1], недавние исследования выявили уязвимость в параметрах LAC уровня безопасности 5, предоставленных во второй тур конкурса. В итоге эти параметры были отозваны заявителями [4].

Среди оставшихся в процессе стандартизации кандидатов присутствуют 2 родственных криптосистемы, которые сочетают в себе высокие показатели безопасности и производительности. Из анализа видно, что алгоритмы NTRU и NTRUPrime имеют максимальное значение итогового параметра безопасности и близкие к максимальным итоговые значения параметра ресурсоёмкости, что означает безусловное преобладание этих криптосистем над соперниками по двум наиболее приоритетным группам критериев.

Таблица – Анализ МИК, прошедших во второй тур конкурса NIST

	Заявки	Classic McEliece	NTS-KEM	Rollo	RQC	BIKE	HQC	LEDACrypt	ThreeBears	FrodoKEM	Round5	CRYSTALS-Kyber	Saber	LAC	NewHope	NTRU Prime	NTRU	SIKE
Безопасность [1, 4]	Изученность	3	3	1	1	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	3	3	1
	Доказательство	3	3	1	1	1	1	1	2	3	1	2	1	1	3	3	3	2
	Устойчивость МИК	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
	Устойчивость ААШ	1	1	2	1	0	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1
	Итого	9	9	5	5	5	6	7	6	9	6	7	6	7	9	9	9	6
Ресурсоёмкость [5]	Производительность инкапсуляции	4	4	3	2	3	3	2	4	2	2	3	3	4	3	4	4	1
	Производительность декапсуляции	3	3	2	2	2	3	1	4	2	4	3	3	4	3	4	4	1
	Производительность генерации ключей	1	1	2	3	4	4	1	4	3	3	3	1	1	1	2	3	1
	Размер открытого ключа	1	1	3	3	2	2	2	4	2	2	3	3	4	3	3	3	4
	Размер шифртекста	4	4	3	3	2	2	2	3	1	2	3	3	3	3	3	3	4
	Возможность некорректной декапсуляции	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	Итого	14	13	13	14	13	14	8	19	10	13	15	13	16	13	17	18	12
Гибкость [1, 4]	Гибкость МИК	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	Гибкость ААШ	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	2	0	0	0
	Особенности алгоритма	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3	1	0	0	-1	0	0	2
	Итого	0	1	1	0	1	0	2	2	1	4	1	1	3	2	0	0	2

Продолжая рассмотрение существующих между группами критериев зависимостей, стоит отдельно остановиться на гибкости. Гибкость позволяет в некоторой степени нивелировать ограничения производительности криптосистемы путём настройки её параметров. Однако главное преимущество более гибких алгоритмов по сравнению с менее гибкими состоит в возможности их адаптации под особенности конкретного объекта защиты. Например, алгоритм Round5 способен не только предоставлять возможность регулирования показателей производительности и безопасности, но также обеспечивать необходимый баланс между расходом CPU и пропускной способностью [2]. Поэтому, несмотря на не очень высокую общую производительность Round5, отражённую в анализе, он обладает потенциалом для использования в ситуациях, предъявляющих специфичные требования криптосистеме, которые не могут быть покрыты другими алгоритмами.

Как известно, во втором туре конкурса NIST присутствует несколько пар идентичных алгоритмов, реализующих общие принципы функционирования:

- Classic McEllice и NTS-KEM, основанные на кодах Гоппы;
- Rollo и RQC, основанные на низкоранговых кодах;
- HQC и LEDAcrypt, основанные на кодах Хемминга;
- NTRU и NTRUprime, основанные на проблеме NTRU (усечённом кольце полиномов N -й степени).

Проведённый анализ подтверждает, что эти пары алгоритмов обладают не только схожими принципами функционирования, но также аналогичными достоинствами и ограничениями. Таким образом, слияние каждой из них в один алгоритм или выбор одного лучшего алгоритма из пары при переходе на следующий этап конкурса NIST представляется разумным способом упрощения процесса выбора постквантовых стандартов.

Выводы. Конкурс NIST для постквантовых криптосистем является динамическим процессом. Теоретические и практические аспекты новых криптосистем постоянно дорабатываются заявителями. Даже если новым алгоритмам не удастся занять роли стандартов в результате текущего процесса стандартизации, они могут значительно укрепить свои позиции вследствие будущих исследований. Сам факт того, что подобные заявки прошли во 2-й тур соревнования NIST свидетельствует о том, что они вызывают заинтересованность, а их доказательство внушает некоторую уверенность.

В ходе данного исследования были достигнуты следующие результаты:

- на основе существующих количественных и качественных характеристик постквантовых криптосистем, в частности МИК, предложена система критериев, позволяющих провести всесторонний анализ и сравнение алгоритмов;
- проведена формализованная оценка по этим критериям и анализ постквантовых МИК, которые прошли во второй тур конкурса NIST;
- определены 2 МИК, которые представляются оптимальными с точки зрения значимости критериев, заявленной NIST;
- выделены наборы алгоритмов, слияние которых может упростить процедуру выбора стандарта;
- раскрыт характер взаимных зависимостей между группами критериев оценки алгоритмов.

Использованный набор критериев и подход к сравнению МИК могут быть легко адаптированы для проведения аналогичного анализа кандидатов на роль постквантового стандарта ЭЦП.

Кроме того, результаты анализа могут быть использованы для более глубокого исследования соответствия криптографических алгоритмов требованиям конкретных протоколов, приложений и других предполагаемых сценариев использования будущих стандартов.

Библиографический список

1. Alagic J. Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process / J. Alagic, J. Alperin-Sheriff, D. Apon, D. Cooper, Q. Dang, Yi-Kai Liu., C. Miller, D. Moody, R. Peralta, R. Perlner, A. Robinson, D. Smith-Tone // National Institute of Standards and Technology. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8240>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
2. Baan H. Round5: KEM and PKE based on (Ring) Learning with Rounding / H. Baan, S. Bhattacharya, S. Fluhrer, O. Garcia-Morchon1, T. Laarhoven, R. Player, R. Rietman1, M.-J. O. Saarinen, L. Tolhuizen1, J. L. Torre-Arce, Z. Zhang. – Режим доступа: <https://csrc.nist.gov/Projects/Post-Quantum-Cryptography/Round-2-Submissions>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
3. Chen L. Report on Post-Quantum Cryptography / L. Chen, S. Jordan, Y. K. Liu, D. Moody, R. Peralta, R. Perlner, D. Smith-tone // National Institute of Standards and Technology. – Режим доступа: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8105>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
4. Moody D. Round2 of the NIST PQC “Competition” what was NIST thinking? / D. Moody // National Institute of Standards and Technology. – Режим доступа: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/Round-2-of-the-NIST-PQC-Competition-What-was-NIST/images-media/pqcrypto-may2019-moody.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
5. Nist software performance tests. – Режим доступа: <https://www.safecrypto.eu/pqclounge/round-1-candidates/software-analysis-kem/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
6. Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer / P. Shor // SIAM Journal on Computing. – 1997. – Vol. 26, № 5. – С.1484–1509.
7. Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Post-Quantum Cryptography Standardization Process // National Institute of Standards and Technology. – Режим доступа: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Post-Quantum-Cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Alagic J., Alperin-Sheriff J., Apon D., Cooper D., Dang Q., Yi-Kai Liu., Miller C., Moody D., Peralta R., Perlner R., Robinson A., Smith-Tone D. Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process. *National Institute of Standards and Technology*. Available at: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8240>.
2. Baan H., Bhattacharya S., Fluhrer S., Garcia-Morchon O., Laarhoven T., Player R., Rietman R., Saarinen M.-J. O., Tolhuizen L., Torre-Arce J. L., Zhang Z. Round5: KEM and PKE based on (Ring) Learning with Rounding. *National Institute of Standards and Technology*. Available at: <https://csrc.nist.gov/Projects/Post-Quantum-Cryptography/Round-2-Submissions>.
3. Chen L., Jordan S., Liu Y.K., Moody D., Peralta R., Perlner R., Smith-tone D. Report on Post-Quantum Cryptography. *National Institute of Standards and Technology*. Available at: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8105>.
4. Moody D. Round2 of the NIST PQC “Competition” what was NIST thinking. *National Institute of Standards and Technology*. Available at: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/Round-2-of-the-NIST-PQC-Competition-What-was-NIST/images-media/pqcrypto-may2019-moody.pdf>.
5. *Nist software performance tests*. Available at: <https://www.safecrypto.eu/pqclounge/round-1-candidates/software-analysis-kem/>.
6. Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. *SIAM Journal on Computing*, 1997, vol. 26, no. 5, pp 1484–1509.
7. Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Post-Quantum Cryptography Standartization Process. Available at: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Post-Quantum-Cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016.pdf>.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.127-135

УДК 004.01

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УГРОЗ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ
КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
С УЧЕТОМ МЕТОДОВ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ**

Статья поступила в редакцию 13.11.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

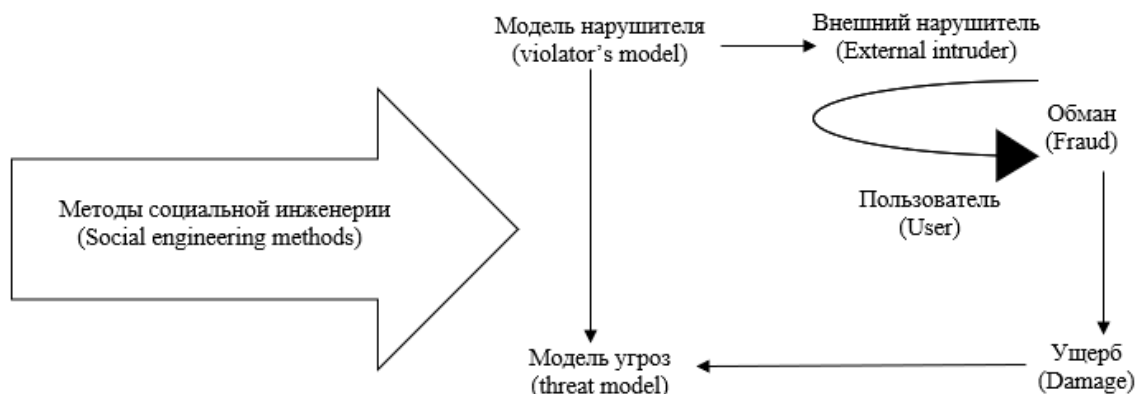
Новикова Елизавета Федоровна, Кубанский государственный университет, 350072, Российская федерация, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, аспирант, e-mail: lizanovicova@mail.ru

Хализев Вячеслав Николаевич, Кубанский государственный университет, 350072, Российская федерация, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, кандидат технических наук, профессор e-mail: ha53@mail.ru

Рассмотрен новый подход к разработке модели угроз безопасности информации объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Значимость настоящей работы обуславливается увеличением компьютеризации населения, что повышает вероятность возникновения угроз от использования методов социальной инженерии. Вследствие отсутствия до конца проработанной нормативной и методической базы в области безопасности объектов КИИ в работе используется как основа обязательная к реализации «классическая» методика ФСТЭК формирования модели угроз безопасности информации. Данная модель расширяется компонентами, учитывающими человеческий фактор, который отсутствует в «классической» методике. В статье выделены виды нарушителей, которые могут использовать методы социальной инженерии, а также непосредственно сопоставлены нарушители и реализуемые ими методы. Приводятся возможные деревья угроз и атак. Результаты данного исследования являются основой для программной реализации системы моделирования угроз и выработки мер противодействия.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, категорирование, объект критической информационной инфраструктуры, модель потенциального нарушителя, модель угроз безопасности информации, человеческий фактор, социальная инженерия

Графическая аннотация (Graphical annotation)



THE DEVELOPMENT OF A THREAT MODEL FOR CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE FACILITIES CONSIDERING SOCIAL ENGINEERING METHODS

The article was received by the editorial board on 13.11.2019, in the final version – 25.11.2019.

Novikova Elizaveta F., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,
post-graduate student, e-mail: lizanovicova@mail.ru

Khalizev Vyacheslav N., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: ha53@mail.ru

A new approach to the development of an information threat model of critical information infrastructure objects is considered. The significance of this work is determined by the increasing computerization of the population, which increases the likelihood of threats from the use of social engineering methods. Due to the lack of a fully developed regulatory and methodological base in the field of security of CII objects, the work uses the "classical" FSTEC methodology to create a mandatory model of information security threats. This model is expanded by components that take into account the human factor, which is absent in the "classical" methodology. The article defines the types of violators who can use the social engineering methods, as well as directly correlates the violators and the methods that they implement. Possible trees of threats and attacks are given. The results of this study are the basis for the software implementation of an information threat model and the development of countermeasures.

Key words: critical information infrastructure, categorization, object of critical information infrastructure, violator's model, information threat model, human factor, social engineering

Введение. 1 января 2018 г. вступил в силу Федеральный закон № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [10], который регулирует отношения в области обеспечения безопасности объектов КИИ в целях ее устойчивого функционирования при проведении в отношении нее компьютерных атак. Принятие данного закона стало новым этапом в развитии законодательства в области информационной безопасности [1].

Несмотря на то, что Федеральный закон № 187-ФЗ был принят почти два года назад, многие законодательные и методические «дырки», связанные с безопасностью объектов критической информационной инфраструктуры, так и остаются «незакрытыми».

Литературу, связанную с безопасностью объектов КИИ, в настоящее время целесообразно разделить на два периода: опубликованные до 1 января 2018 г. и после. Это разделение связано с устареванием или неактуальностью информации, содержащейся в них. Так, объекты КИИ ранее рассматривались в рамках законодательства, связанного с безопасностью АСУ ТП. Для подтверждения этого приведем в качестве примера [2], в котором в разделе 2 рассматривается «модель нарушителя» и «модель угроз для АСУ ТП».

Литература, являющаяся частью «нового» периода вследствие малого времени от вступления в силу Федерального закона № 187-ФЗ, немногочисленна и из-за отсутствия до конца проработанной нормативной базы в большинстве случаев носит характер аналитических обзоров.

Так, в статье [1] приведен обзор структуры органов государственной власти в области обеспечения безопасности объектов КИИ.

В работе [3] дан аналитический обзор подходов к идентификации объектов КИИ, который отражен в документе [12]. Также [3] отражает подход, используемый на территории Российской Федерации; поднимает вопрос категорирования объектов КИИ. В данной статье впервые автором поднимается вопрос о расширении модели угроз безопасности информации человеческим фактором. В качестве объекта рассмотрения он выбран не случайно. Сегодня человек, «управляющий» информационно-техническим миром, зачастую может не «успеть» за бесконечно развивающимся информационно-техническим миром. Эмоции, неопытность, наивное поведение иногда становятся уязвимостями, через которые возможна реализация угроз безопасности КИИ, что может повлечь за собой потери. Примером может быть схема взлома по телефону, когда при звонке нарушитель входит в доверие к жертве, представляясь, например, сотрудником банка.

О методах социальной инженерии есть упоминание в методическом документе [7]. В нем определено, что одна из угроз безопасности информации может быть реализована нарушителями за счет воздействия на пользователей, администраторов безопасности, администраторов информационной системы или обслуживающий персонал (социальная инженерия).

Приведем определения некоторых терминов.

Фишинг – метод социальной инженерии, целью которого является получение конфиденциальных данных пользователей – логина и пароля. Примером такой схемы является отправка сообщений, содержащих ссылки на фальшивые веб-страницы. Троянский конь – атака, при которой также осуществляется сбор конфиденциальной информации, однако при реализации схемы фишинга атака происходит на стороннем ресурсе, а троянского коня – утечка идет с автоматизированного рабочего места (АРМ) пользователя.

Претекстинг – метод социальной инженерии, в рамках которого нарушитель выдает себя за лицо, являющееся доверенным лицом по отношению к жертве.

Кви про кво – метод социальной инженерии, при реализации которого злоумышленник использует контактный телефон или корпоративную почту. Целью атаки является получение информации при оказании «помощи», например, подставным оператором технической поддержки.

Обратная социальная инженерия – атака, направленная на создание злоумышленником условий, при которых жертва сама обращается к нарушителю.

Анализ существующих источников по разработке «модели нарушителя и угроз объектов КИИ» отражает их «незаконченность» при отсутствии угроз безопасности от методов социальной инженерии.

Использование схем фишинга, претекстинга, кви про кво, троянского коня, обратной социальной инженерии могут нанести большой урон существующим системам [11].

Таким образом, актуальной задачей является разработка модели угроз безопасности информации, расширенной человеческим фактором, а именно, защитой объектов от атак, использующих методы социальной инженерии.

Постановка задачи. Целью данной работы является введение учета человеческого фактора, а именно защиты от атак, использующих методы социальной инженерии, в модель угроз безопасности информации.

Основной задачей является непосредственно разработка методики для формирования модели угроз безопасности информации.

Методы. Любая информационная система должна быть включена в документ «Модель угроз и нарушителя». Задача на первый взгляд кажется легкой, но в условиях некоторой методической неопределенности осуществить это может быть трудно.

С одной стороны, когда нет методической базы, можно использовать какой-либо стандартный шаблон, согласно которому непосредственно разрабатывать требуемое. Пример: модели угроз и нарушителя для информационной системы персональных данных (ИСПДн) и государственной информационной системы (ГИС) имеют похожую структуру. Следовательно, для объектов КИИ модель угроз и нарушителя будет отличаться только в характерных, свойственных объекту КИИ отношениях.

С другой стороны, при отсутствии методической базы, проверяющий из организации-регулятора может видеть «правду» по-другому, что станет причиной изменений внутренних документов организации и дополнительных перепроверок.

Если представить, что субъективизма проверяющего нет, то остается некий «шаблон», который к тому же является в своем роде стандартным, что значит универсальным.

При разработке «Модели угроз и нарушителя» можно ориентироваться как на действующие методики («Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в инфор-

мационных системах персональных данных» [5], «Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [6], «Меры защиты информации в государственных информационных системах» [4]), так и на проекты методик («Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах» [7]).

При выполнении разработки начальным этапом каждой модели угроз и нарушителя является детальное описание каждого объекта КИИ, формирующее перечень защищаемых ресурсов. Данное описание должно иметь «правдивый» характер и включать в себя следующее:

- описание непосредственно организации, владеющей или арендующей объект КИИ;
- описание информационной системы (ИС), определяющее точное назначение и состав данных объектов КИИ в организации и показывающее схемы потоков защищаемой информации, а также отражающее перечень и состав обрабатываемой информации;
- таблицы допуска пользователей к ресурсам;
- схему локально-вычислительной сети (ЛВС) организации.

Вышеперечисленные пункты помогают выявить более широкий перечень угроз безопасности объектов КИИ.

Далее следует выполнить категорирование объектов КИИ, опираясь на методы, закрепленные законодательно [8, 9].

На следующем этапе следует обратиться к «классической» модели: перед субъектом КИИ стоит задача классификации, или же, ориентируясь на существующее законодательство, категорирование объектов КИИ. Так, «Перечень показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений» [8] определяет 14 пунктов. Согласно им требуется провести экспертную оценку, т.е. в некотором роде определить субъективную оценку в соответствии с социальной, политической, экономической, экологической значимостью, значимостью для обеспечения обороны страны, безопасности страны и правопорядка. Субъективизм зависит только от мнения эксперта.

Определение категории объекта КИИ дает основание для разработки «Модели потенциального нарушителя», где в соответствии все с теми же методиками определяется актуальность, возможность и потенциал для всех типов нарушителей.

Если ориентироваться на Методику [7], то наиболее вероятными нарушителями, использующими методы социальной инженерии, являются специальные службы иностранных государств (блоков государств), внешние субъекты (физические лица), конкурирующие организации, преступные группы (криминальные структуры), администраторы информационной системы и администраторы безопасности. В первом случае нарушители интересуют наиболее значимые объекты государства, при этом целью является получение лидерства на мировой арене в экономике, политике, медицине, оборонно-промышленном комплексе.

Внешний субъект всегда будет актуальным в отношении к объекту КИИ, потому что интерес получить доступ к чему-то запрещенному не угасает никогда в людях.

Физические лица могут как целенаправленно, так и бесцельно стремиться к взлому, нарушению; использовать зачастую методы социальной инженерии.

Конкурирующие организации преследуют цель установления лидерства в какой-либо отрасли как на территории одного региона или государства, так и в случае наличия возможностей для этого – на территории нескольких государств. Для конкурирующих организаций методы социальной инженерии – один из основных способов добывания информации.

Преступные группы, администраторы ИС и администраторы безопасности своей целью могут ставить выявление уязвимостей, а также сбор информации, представляющей собой коммерческую или государственную тайну, для их продажи и получения выгоды.

Следует также учитывать, что существует конкурентная разведка, при реализации которой могут использоваться методы социальной инженерии, но в рамках действующего законодательства.

Подведение итогов. Использование «Модели потенциального нарушителя» может служить основой для разработки «Модели угроз безопасности информации» объектов КИИ.

На данном этапе в соответствии с архитектурой инфраструктуры выделяются объекты воздействия. В данном случае субъекты, кстати, тоже являются объектом воздействия [7]. Если задуматься, то «физическое устранение», например, администратора ИС, который единственный в организации знал все ключи и пароли, может привести к нарушению функционирования объекта КИИ в случае его выключения [3].

Таблица 1 – Виды нарушителей, использующих методы социальной инженерии

Вид нарушителя	Описание
Специальные службы иностранных государств (блоков государств)	Тип нарушителя: внешний, внутренний. Потенциал нарушителя: высокий. Методы социальной инженерии: фишинг, троянский конь, кви про кво.
Внешние субъекты (физические лица)	Тип нарушителя: внешний. Потенциал нарушителя: низкий. Методы социальной инженерии: фишинг, троянский конь, претекстинг, кви про кво.
Конкурирующие организации	Тип нарушителя: внешний. Потенциал нарушителя: средний. Методы социальной инженерии: фишинг, троянский конь, претекстинг, кви про кво.
Преступные группы (криминальные структуры)	Тип нарушителя: внешний. Потенциал нарушителя: средний. Методы социальной инженерии: фишинг, троянский конь, претекстинг, кви про кво.
Администраторы информационной системы и администраторы безопасности	Тип нарушителя: внутренний. Потенциал нарушителя: средний. Методы социальной инженерии: претекстинг.

Ссылаясь на вышесказанное, можно составить дерево атак, одна из ветвей которой представлена на рисунке 1.

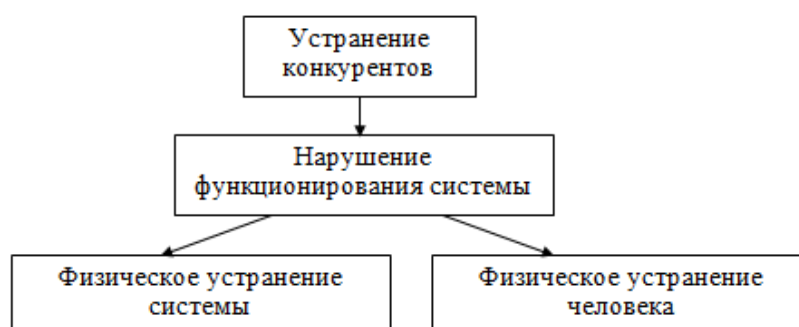


Рисунок 1 – Дерево атак

Под «физическим устранением системы» понимается нарушение функционирования объекта КИИ, «физическим устранением человека» – невозможность ответственного сотрудника находиться на рабочем месте с полным отсутствием связи с ним.

Дерево угроз, если рассматривать его с позиций классификации на естественные и искусственные угрозы, всегда содержит в «искусственной» ветви человеческий фактор, так как именно человек является зачастую главной угрозой вследствие своих эмоциональных и поведенческих характеристик: любопытство, зависть, неопытность и т.д. (рис. 2).

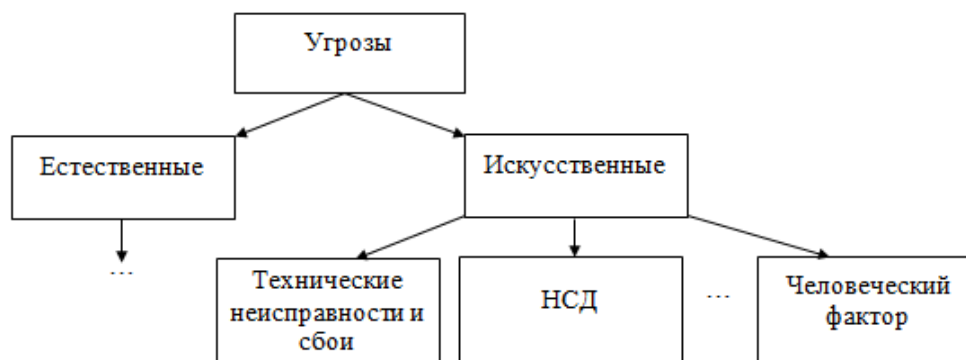


Рисунок 2 – Дерево угроз

Несмотря на наличие человеческого фактора в дереве угроз, в «Модель угроз безопасности информации» он не попадает. И новым в данном исследовании является факт самого внесения человеческого фактора, т.е. в данном случае отход от «стандартного» шаблона.

На основании этого «Модель угроз безопасности информации» будет иметь расширенный вид за счет введения в нее угроз от реализации методов социальной инженерии.

Результаты. Результатом данного исследования является подготовка полной теоретической базы для реализации программного комплекса (ПК) по разработке «модели нарушителя и угроз» объектов КИИ. При написании ПК будут использованы базы данных. Выходными данными ПК станет пакет документов по объектам КИИ: акт категорирования объектов КИИ, перечень объектов КИИ, заключение о формировании перечня объектов КИИ, приказ об ответственности за обеспечение безопасности объектов КИИ, приказ о создании комиссии по категорированию объектов КИИ, уведомление ФСТЭК России о результатах категорирования объектов КИИ, модель нарушителя и угроз объектов КИИ. При этом реализуемая модель не будет противоречить действующим нормативным документам, а лишь дополнять их.

Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры. В соответствии с п. 6 «Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [8] объекту КИИ по результатам категорирования присваивается категория с наивысшим значением или не присваивается вовсе, если ни один из показателей не применим к данному объекту:

$$K = \max(K_j),$$

где K_j – показатель.

Разработка модели угроз безопасности информации. Независимо от характера угрозы любая из них должна быть рассмотрена отдельно. Показатель актуальности угрозы безопасности:

$$УБИ_j^A = [P_j; X_j],$$

где P_j – вероятность или возможность реализации угрозы; X_j – степень ущерба.

Вероятность или возможность реализации угрозы:

$$P_j = [K; Y],$$

где K – категория; Y – потенциал нарушителя.

Исходя из заданных параметров, можно составить таблицу, отражающую вероятность (возможность) реализации угрозы безопасности информации нарушителем на объект КИИ (табл. 2).

Таблица 2 – Вероятность (возможность) реализации угрозы безопасности информации нарушителем на объект КИИ

Потенциал нарушителя	Категория объекта КИИ		
	3	2	1
Низкий	Низкая	Средняя	Высокая
Средний	Средняя	Высокая	Высокая
Высокий	Высокая	Высокая	Высокая

Степень возможного ущерба объекта КИИ при реализации угрозы безопасности может быть высокой, средней и низкой. В первом случае нарушение одного из свойств безопасности информации может привести к существенным негативным последствиям для субъекта КИИ, в последнем случае – возможны незначительные последствия негативного характера. Знание вероятности (возможности) реализации угрозы безопасности информации нарушителем на объект КИИ и степени возможного ущерба позволяет определить актуальность угрозы безопасности информации (табл. 3).

Таблица 3 – Определение актуальности угрозы безопасности информации

Вероятность (возможность) реализации угрозы	Степень возможного ущерба		
	Низкая	Средняя	Высокая
Низкая	Неактуальная	Неактуальная	Актуальная
Средняя	Неактуальная	Актуальная	Актуальная
Высокая	Актуальная	Актуальная	Актуальная

Построение системы защиты информации на основе данной модели должно перекрывать как угрозы, подходящие под определение человеческого фактора, так и любую другую угрозу, реализуемую при помощи технических или организационных мер (табл. 4).

Таблица 4 – Построение системы защиты информации для объекта КИИ с учетом возможностей использования нарушителями методов социальной инженерии

Метод социальной инженерии, используемый нарушителем	Меры борьбы
Фишинг	Обучение пользователей ИС правилам использования ресурсов интернета; ознакомление их с политикой конфиденциальности; использование антивирусного программного обеспечения (АВПО), использование межсетевых экранов (МЭ)
Троянский конь	Ознакомление с политикой конфиденциальности, использование АВПО, использование МЭ
Претекстинг	Ознакомление с политикой конфиденциальности
Кви про кво	Ознакомление с политикой конфиденциальности

Таким образом, система защиты информации для объекта КИИ будет использовать как технические меры, так и организационные. К техническим относится использование программно-аппаратных средств: АВПО и МЭ. В качестве организационных мер выступают обучение пользователей ИС правилам использования ресурсов интернета и ознакомление с политикой конфиденциальности. Если ориентироваться на возможные затраты, то обучение и ознакомление должно носить тестовый характер внутри организации с занесением данных в «Журнал учета пользователей».

Итоговый алгоритм по разработке модели нарушителя и угроз безопасности информации объекта КИИ в упрощенном виде имеет следующий вид (рис. 3).



Рисунок 3 – Алгоритм по разработке модели нарушителя и угроз безопасности информации объекта КИИ

Заключение. В данной статье представлена теоретическая база, которая станет основой для разработки программного комплекса.

Данная теоретическая база включает в себя модель нарушителя и угроз для объектов КИИ. Рассмотрен процесс категорирования объектов критической информационной инфраструктуры, представлен алгоритм непосредственно расчета актуальности угроз.

Новым в данной теоретической базе является введение человеческого фактора и угроз, связанных с использованием методов социальной инженерии. Также разработка этой базы осуществлялась в условиях методической неопределенности, что повышает актуальность работы.

Библиографический список

1. Бердник М. В. Структура органов государственной власти в области безопасности критической информационной инфраструктуры / М. В. Бердник, М. Б. Гострый, Е. Ф. Новикова // Вопросы кибербезопасности,

- моделирования и обработки информации в современных социотехнических системах. – 2018. – № 6. – С. 85–92.
2. Глухов А. П. Моделирование процессов нарушения информационной безопасности критической инфраструктуры / А. П. Глухов, Горбачев И. Е. // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 38. – С. 112–135.
 3. Новикова Е. Ф. Критическая информационная инфраструктура: модель безопасности / Е. Ф. Новикова, В. Н. Хализев // Социотехнические и гуманитарные аспекты информационной безопасности : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Пятигорск : ПГУ, 2019. С. 247–252.
 4. Методический документ ФСТЭК России «Меры защиты информации в государственных информационных системах». 2014 г. – 176 с. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/675>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.09.2019).
 5. Методический документ ФСТЭК России «Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных». – 2008. – 69 с. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/289>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.09.2019).
 6. Методический документ ФСТЭК России «Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных». – 2008. – 10 с. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/290>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.09.2019).
 7. Методический документ ФСТЭК России «Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах» (проект). – 2015. – 43 с. – Режим доступа: <http://fstec.ru/component/attachments/download/812>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.09.2019).
 8. Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 № 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений». – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_290595, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 16.09.2019).
 9. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (зарегистрировано в Минюсте России 26.03.2018 № 50524). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294287, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 17.09.2019).
 10. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 15.09.2019).
 11. Чернигин Ю. Социальная инженерия. Вводный материал. – Режим доступа: <https://www.volgablob.ru/blog/?p=1722>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 19.09.2019).
 12. Methodologies for the identification of Critical Information Infrastructure assets and services. – Режим доступа: <https://www.enisa.europa.eu/publications/methodologies-for-the-identification-of-ciiis>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 10.09.2019).

References

1. Berdnik M. V., Gostroy M. B., Novikova E. F. Struktura organov gosudarstvennoy vlasti v oblasti bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Structure of governmental departments in the field of providing the security of critical information infrastructure]. *Voprosy kiberbezopasnosti, modelirovaniya i obrabotki informatsii v sovremennykh sotsiotekhnicheskikh sistemakh* [Problems of Cybersecurity, Modeling and Information Processing in Modern Socio-technical Systems], 2018, issue 6, pp. 85–92.
2. Glukhov A. P., Gorbachev I. E. Modelirovaniye protsessov narusheniya informatsionnoy bezopasnosti kriticheskoy infrastruktury [Modeling the processes of violation of information security of critical infrastructure]. *Trudy SPIIRAN* [Scientific works of SPIIRAS], 2015, issue 38, pp. 112–135.
3. Novikova E. F., Khalizev V. N. Kriticheskaya informatsionnaya infrastruktura: model bezopasnosti [Critical Information Infrastructure: Security Model]. *Sotsiotekhnicheskie i gumanitarnye aspekty informatsionnoy bezopasnosti : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Sociotechnical and humanitarian aspects of information security : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Pyatigorsk, Pyatigorsk State University, 2019, pp. 247–252.
4. Metodicheskiy dokument FSTEC Rossii “Mery zashchity informatsii v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh” [Guidance document of the FSTEC of Russia “Information security measures in state information systems”], 2014, 176 p. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/675> (accessed 18.10.2019).
5. Metodicheskiy dokument FSTEC Rossii “Bazovaya model ugroz bezopasnosti personalnykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personalnykh dannykh” [Guidance document of the FSTEC of Russia “The basic model of personal data security threats when they are processed in personal data information systems”], 2008. 69 p. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/289> (accessed 15.09.2019).
6. Metodicheskiy dokument FSTEC Rossii “Metodika opredeleniya aktualnykh ugroz bezopasnosti personalnykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personalnykh dannykh” [Guidance document of the FSTEC of Russia “Methodology for determining current threats to the security of personal data during their processing in personal data information systems”], 2008. 10 p. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/290> (accessed 15.09.2019).

7. *Metodicheskiy dokument FSTEC Rossii "Metodika opredeleniya ugroz bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh"* (proekt) [Guidance document of the FSTEC of Russia "Methodology for identifying threats to information security in information systems" (project)], 2015. 43 p. Available at: <http://fstec.ru/component/attachments/download/812> (accessed 18.09.2019).

8. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 08.02.2018 № 127 "Ob utverzhdenii Pravil kategorirovaniya obektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii, a takzhe perechnya pokazateley kriteriev znachimosti obektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii i ikh znacheniy"* [Decree of the Government of the Russian Federation dated February 8, 2018 no. 127 "On Approval of the Rules for the Categorization of Objects of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation, as well as a list of indicators of criteria of significance of objects of critical information infrastructure of the Russian Federation and their values"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_290595 (accessed 16.09.2019).

9. *Prikaz FSTEC Rossii ot 25.12.2017 № 239 "Ob utverzhdenii Trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti znachimykh obektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii"* [Order of the FSTEC of Russia dated December 25, 2017 no. 239 "On approving the Requirements to ensure the security of significant objects of the critical information infrastructure of the Russian Federation"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294287 (accessed 17.09.2019).

10. *Federalnyy zakon ot 26.07.2017 № 187-FZ "O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law dated 26.07.2017 no. 187-FZ "On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885 (accessed 15.09.2019).

11. Chernidin Yu. *Sotsialnaya inzheneriya. Vvodnyy material* [Social Engineering. Introductory material]. Available at: <https://www.volgablo.ru/blog/?p=1722> (accessed 10.09.2019).

12. *Methodologies for the identification of Critical Information Infrastructure assets and services*. Available at: <https://www.enisa.europa.eu/publications/methodologies-for-the-identification-of-ciis> (accessed 10.09.2019).

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.135-143

УДК 004.056

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕССЕНДЖЕРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИМЫХ ДАННЫХ

Статья поступила в редакцию 13.11.2019, в окончательном варианте – 22.11.2019.

Путято Михаил Михайлович, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2, кандидат технических наук, доцент, 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, e-mail: msanya@yandex.ru

В статье представлен анализ и классификация мессенджеров на основе анализа уровня безопасности хранимых данных. Произведен обзор современного состояния рынка мобильного приложения класса IM и введены критерии оценки безопасности систем мгновенного обмена сообщениями на основе фактической реализации заявленных алгоритмов и методов шифрования. Рассмотрены аспекты в области безопасности, защиты и хранения данных мессенджеров: данные пользователя на устройстве, журналы событий, ключи шифрования, критичная информация в базах данных, защищенность мессенджеров от атак с физическим доступом к устройству. Производится изучение механизма мессенджера Signal: организация хранения данных и реализация принципов защищенности для хранимых данных. На его примере рассмотрены схемы реализации и использования баз данных мобильного устройства. Выявлены недостатки использования подсистем шифрования и организации баз данных телефонных номеров, отметок регистрации пользователей, текстовых сообщений и медиафайлов, в связи с чем появляется возможность автоматизированного съема критичной информации. В результате сформулированы рекомендации по обеспечению безопасности мессенджеров для разработчиков и пользователей: шифровать вложения мессенджера, переместить все данные из доступного для пользователя пространства памяти в закрытое хранилище приложения, использовать запутывающие названия файлов, шифровать критичные данные в базах данных (сообщения, путь к вложениям, информация о контактах и пр.), использовать дополнительный слой для шифрования критичных данных при условии включенной надстройки, обеспечивающей обязательность ввода парольной фразы для открытия приложения на смартфоне, шифровать непосредственно сами базы данных.

Ключевые слова: анализ, кибербезопасность, форензика, мессенджер, протокол шифрования, защита информации, база данных

Графическая аннотация (Graphical annotation)



CLASSIFICATION OF MESSENGERS BASED ON ANALYSIS OF THE SECURITY LEVEL OF STORED DATA

The article was received by the editorial board on 13.11.2019, in the final version – 22.11.2019.

Putyato Michael M., Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci (Engineering), Associate Professor, 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, e-mail: msanya@yandex.ru

The article presents the analysis and classification of instant messengers based on the analysis of the level of security of stored data. A review of the current state of the market for mobile applications of the IM class is carried out and criteria for assessing the security of instant messaging systems based on the actual implementation of the claimed encryption algorithms and methods are introduced. Aspects in the field of security, protection and storage of messenger data are considered: user data on the device, event logs, encryption keys, critical information in the databases, the security of instant messengers from attacks with physical access to the device. The Signal messenger mechanism is being studied: organizing data storage and implementing security principles for stored data. On his example, schemes for the implementation and use of databases of a mobile device are considered. Disadvantages of using the encryption subsystems and organizing databases of telephone numbers, user registration marks, text messages and media files have been identified. In this connection, it becomes possible to automatically extract critical information. As a result, recommendations for securing messengers for developers and users were formulated: encrypt messenger attachments, move all data from the user's available memory space to the application's private storage, use confusing file names, encrypt critical data in databases (messages, attachment path, information about contacts, etc.), use an additional layer of encryption critical for data, provided that an add-in is provided that makes it mandatory enter a passphrase to open the application on your smartphone, directly encrypt the databases themselves.

Key words: analysis, cybersecurity, forensics, messenger, encryption protocol, information security, database

Введение. При рассмотрении современных средств организации электронного общения в первую очередь необходимо отметить системы мгновенного обмена сообщениями (Instant Messaging, IM). Система мгновенного обмена сообщениями – это службы для обмена сообщениями.

ми в режиме реального времени. Если раньше основными платформами для реализации общения при помощи электронных средств выступали стационарные и мобильные компьютеры, то сегодня это в основном мобильные устройства связи. В связи с этим на современном рынке мобильных мессенджеров представлено достаточно много мобильных приложений, которые решают одну или несколько следующих задач: передача текста, изображений, видео, звука, в том числе звуковых и видеосообщений, организация видеочата, групповых бесед, конференций и т.д.

Функциональность и актуальные механизмы защиты мобильных мессенджеров. Традиционными функциями программных клиентов для мгновенного обмена сообщениями являются:

- чат (текстовый, голосовой и видеочат);
- передача файлов;
- инструменты для совместной работы в режиме реального времени;
- напоминания и оповещения;
- звонки на компьютер;
- возможность отправки SMS;
- хранение истории общения с контактами;
- индикация сетевого статуса присутствия собеседников (в сети или отсутствует), занесенных в список контактов.

Также использование такой категории программ имеет целый ряд преимуществ:

- экономия времени;
- экономия средств (передача данных использует канал интернет);
- возможность общения в любой ситуации, пользуясь многообразием отправки сообщений (текст, аудио, видео, изображения);
- кроссплатформенность: приложение на смартфоне, веб-версия с использованием браузера, десктопные версии приложений;
- отсутствие понятий роуминга, региональной связи, территориальных ограничений;
- история общения и т.д.

Основываясь на анализе, представленном в статье “Самые защищенные мессенджеры” [4], можно говорить о том, что все современные мессенджеры, такие как Telegram, Signal, Viber, WhatsApp, Briar, ТамТам, ВКонтакте, Facebook Messenger, Wire, Jabber, Riot Matrix, Status, Threema, так или иначе удовлетворяют современным требованиям к безопасности общения и обмена информацией.

В то же время, согласно рейтингу [3], составленному Роскачеством, можем опираться на следующие данные:

- 39 % россиян звонят с помощью мессенджеров чаще или не реже, чем по телефону;
- мессенджеры в 2018 г. занимают первое место по использованию, второе – звонки;
- наиболее популярные мессенджеры: WhatsApp (69 %), Viber (57 %), Skype (45 %);
- в российском сегменте магазинов App Store и Google Play – 49 приложений (25 для iOS и 24 для Android), позволяющих пользователям мгновенно обмениваться сообщениями, в том числе – осуществлять звонки;
- количество приложений, которые перешагнули итоговую отметку в 4 балла, составляет 14 из 49;
- небезопасных приложений выявлено не было, однако у ряда мессенджеров отсутствует сквозное шифрование, что не дает права называть их защищенными;
- наиболее функциональные: для iOS и Android – «ТамТам» (4,51), ICQ (4,38) и «Mail.ru Агент» (4,38);
- наиболее функциональные: для iOS и Android – «ТамТам» (4,51), ICQ (4,38) и «Mail.ru Агент» (4,38);
- наиболее удобные: для iOS – Messenger (Facebook) (4,85), Threema (4,85) и Skype (4,7); для Android – Threema (4,79), «ВКонтакте» (4,68) и Skype (4,64);
- наиболее удобные: для iOS – Messenger (Facebook) (4,85), Threema (4,85) и Skype (4,7); для Android – Threema (4,79), «ВКонтакте» (4,68) и Skype (4,64);
- наиболее защищенные: для iOS – Wickr Me (4,73), Viber (4,57), WhatsApp (4,40) и Wire (4,31); для Android – Wickr Me (4,73), Viber (4,57), Threema (4,57) и Signal (4,35);
- лучшими по совокупности всех критериев признаны приложения WhatsApp, Viber и Skype для iOS и WhatsApp, Viber и Threema для Android.

И в первом, и во втором представленных обзорах [3, 4] речь в основном идет о механизмах защиты приема и передачи информации, а также о программной реализации и поддержки основных механизмов защиты этих данных.

Глава компании «Интернет-розыск | CABIS» Игорь Бедеров согласен, что все методы шифрования выглядят, по меньшей мере, наивными в то время, когда на рынке имеется возможность «пробить» любой телефонный номер по базе сотового оператора, подделать паспорт и заказать дубль сим-карты в салоне сотовой связи. «На всю операцию будет затрачено не более 30 тыс. рублей. Получив копию сим-карты жертвы, злоумышленник запросто переключит на себя все мессенджеры, социальные сети и электронную почту жертвы», – отмечает господин Бедеров [1].

Ни в одном из этих обзоров, так же как и во многих подобных, не рассматриваются следующие аспекты в области безопасности и защиты данных мессенджеров:

- безопасность хранения данных пользователя на устройстве;
- безопасность журналов событий;
- безопасность хранения ключей шифрования;
- безопасность критичной информации в базах данных мессенджеров;
- защищенность мессенджеров от атак с физическим доступом к устройству.

Исходя из этого, ниже рассмотрим систему критериев, которая позволит объективно оценить безопасность реализации и функционирования локальных механизмов обеспечения работы мобильных приложений, так как при наличии физического доступа к устройству качество реализации именно этой части программ будет отвечать за эффективность обеспечения безопасности данных в целом.

Есть мессенджеры, которые вообще не хранят историю переписки на сервере. В этом случае устройство (ваш телефон, например) является одновременно и клиентом, и сервером. Это самый безопасный способ, но мессенджеры «без истории» не пользуются популярностью. Одна из причин – мультиплатформенность мессенджеров с «облачной памятью»: пользователь может войти в свой аккаунт одновременно на телефоне, планшете и компьютере [5].

Анализ использования механизмов защиты в мессенджерах. Для нашего анализа мы выбрали мессенджеры, которые занимают лидирующие позиции на рынке приложений систем мгновенного обмена сообщениями.

Для сравнения программных средств мы сформулировали и уточнили критерии, которые позволяют произвести оценку механизмов защиты с учетом специфики хранения и обработки приложениями критичных данных. Исходя из принципа комплексности, критерии объединены в группы влияния на безопасность мобильного приложения при использовании.

1. Локальные критичные данные – 50 %:

1a. Информация профиля (Не хранится; Хранится, шифруется на стороне клиента; Хранится, не шифруется на стороне клиента).

1b. Метаданные чата (Не хранится; Хранится).

1c. Список контактов (Не хранится; Хранится).

1d. E2EE[6] Cloud Backup (Имеется; Не имеется).

2. Сетевые критичные данные – 20 %:

2a. Подтверждение контракта (Имеется; Не имеется).

2b. Шифрование группового чата (Имеется; Не имеется).

2c. Шифрование передачи файлов (Имеется; Не имеется).

2d. Открытый ключ и IP не связаны (Имеется; Не имеется).

2e. Асинхронное шифрование беседы (Имеется; Не имеется).

2f. Зашифрованные данные клиента (Имеется; Не имеется).

2g. Самоуничтожающиеся сообщения (Имеется; Не имеется).

3. Шифрование [2] – 30 %:

3a. Шифрование (Симметричное) (Имеется; Не имеется).

3b. Шифрование (Ассиметричное) (ECC 256; RSA 2048; Нет).

3c. Forward secrecy (Имеется; Не имеется).

3d. Многократное шифрование (Имеется; Не имеется).

Произведем оценку характеристик систем мгновенного обмена сообщениями, используя описанные выше формальные критерии. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица – Сравнение характеристик систем мгновенного обмена сообщениями

№ п/п	Наименование критерия	Telegram	Signal	WhatsApp	Threema	Viber
1a	Информация профиля	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0
1b	Метаданные чата	0,5	0,5	0,0	0,5	0,0
1c	Списки контактов	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0
1d	E2EE Cloud Backup	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0
2a	Подтверждение контракта	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2b	Шифрование группового чата	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0
2c	Шифрование передачи файлов	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2d	Открытый ключ и IP не связаны	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2
2e	Асинхронное шифрование беседы	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2
2f	Зашифрованные данные клиента	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2g	Самоуничтожающиеся сообщения	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
3a	Шифрование: Симметричное	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3b	Шифрование: Ассимметричное	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
3c	Forward secrecy	0,3	0,3	0,3	0,0	0,3
3d	Многократное шифрование	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Итого		2,5	4,4	3,2	4,4	2,5

Анализ использования механизмов обеспечения безопасности в мессенджерах показывает, что из рассмотренных вариантов лучшие результаты с точки зрения безопасности хранимых данных показывают приложения Signal [7] и Threema [8].

Реализация механизмов защиты мессенджера Signal. Рассмотрим детальнее соответствие заявленных характеристик действительному положению дел на примере мессенджера Signal.

В папке с базами данных мессенджера имеются 3 файла:

- “canonical_address.db”;
- “messages.db”;
- “whisper_directory.db”.

Все базы не зашифрованы и доступны для открытия при наличии физического доступа к смартфону. Если исследовать таблицы, то можно получить следующие результаты.

1. База данных canonical_address.db содержит в себе минимальное количество информации: номера телефонов и их соответствие некоторому идентификатору (рис. 1).

Таблица: canonical_addresses

	_id	address
Фильтр	Фильтр	
1	1	+79054706374
2	2	+79284199661
3	3	+79189557055

Рисунок 1 – Фрагмент базы данных canonical_address.db

2. При исследовании базы данных `whisper_directory.db` ситуация повторяется: имеется таблица, в которой содержатся все считанные номера из устройства с дополнительной отметкой о том, какие из них зарегистрированы в Signal (рис. 2). Если провести параллель с первой базой данных и сопоставить номера, то можно сделать вывод о том, что в первой базе содержатся зарегистрированные в системе Signal аккаунты с соответствующими им номерами.

Таблица: `directory`

	_id	number	registered	relay	timestamp	voice	video
	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр
1	1	+79284199661	1	NULL	1503083660453	1	1
2	2	+79094535713	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
3	3	+79649165686	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
4	4	+79002982239	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
5	5	+79133933208	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
6	6	+79384013431	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
7	7	+79615115742	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
8	8	+79654618661	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
9	9	+79951943897	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
10	10	+79615060898	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
11	11	+79182493918	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
12	12	+79183747040	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
13	13	+79280367734	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL
14	14	+79184793601	0	NULL	1503083660453	NULL	NULL

Рисунок 2 – Фрагмент базы данных `whisper_directory.db`

3. Исследование базы `messages.db` (рис. 3) показало, что структура таблиц очень похожа на структуру, которая используется в стандартном Android-приложении для приема и отправки SMS- и MMS-сообщений.

Структура БД

Данные	Pragmas	Выполнение SQL
Create Table	Modify Table	Удалить таблицу
Имя	Тип	Схема
Таблицы (11)		
android_metadata		CREATE TABLE android_metadata (locale TEXT)
drafts		CREATE TABLE drafts (_id INTEGER PRIMARY KEY, thread_id INTEGER, type TEXT, value TEXT)
groups		CREATE TABLE groups (_id INTEGER PRIMARY KEY, group_id TEXT, title TEXT, members TEXT, avatar BLOB)
identities		CREATE TABLE identities (_id INTEGER PRIMARY KEY, recipient INTEGER UNIQUE, key TEXT, first_use INTEGER)
mms		CREATE TABLE mms (_id INTEGER PRIMARY KEY, thread_id INTEGER, date INTEGER, date_received INTEGER)
mms_addresses		CREATE TABLE mms_addresses (_id INTEGER PRIMARY KEY, mms_id INTEGER, type INTEGER, address TEXT)
part		CREATE TABLE part (_id INTEGER PRIMARY KEY, mid INTEGER, seq INTEGER DEFAULT 0, ct TEXT, name TEXT)
push		CREATE TABLE push (_id INTEGER PRIMARY KEY, type INTEGER, source TEXT, device_id INTEGER, body TEXT)
recipient_preferences		CREATE TABLE recipient_preferences (_id INTEGER PRIMARY KEY, recipient_ids TEXT UNIQUE, block INTEGER)
sms		CREATE TABLE sms (_id INTEGER PRIMARY KEY, thread_id INTEGER, address TEXT, address_device_id INTEGER)
thread		CREATE TABLE thread (_id INTEGER PRIMARY KEY, date INTEGER DEFAULT 0, message_count INTEGER DEFAULT 0)
Индексы (21)		
Представления (0)		
Триггеры (0)		

Рисунок 3 – Фрагмент базы данных `messages.db`

Нас интересуют следующие таблицы:

- “sms”, содержащая информацию о текстовых сообщениях;
- “mms”, содержащая информацию о медиасообщениях;
- “thread”, содержащая информацию об активных чатах;
- “part”, содержащая сведения о файлах медиасообщений.

Таблицы “sms” и “mms” имеют сходную структуру, так что рассмотрим только одну таблицу – “sms” (рис. 4).

Таблица: sms

Добавить запись Удалить запись

type	ply_path_prese	ivery_receipt_co	subject	body	matched_ic
льтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр
1		NULL	0	NULL	NULL
2		NULL	0	NULL	NULL
3		NULL	0	NULL	NULL
4	36997868	1	0	NULL	qqR1K5/PoNCy3CuagnHVas49l23NfPAaDkzdu/7EtqDkY7FgJl6XQuiZqm0AyUuExp...
5	36997865	NULL	1	NULL	KINQTUmf5SQi0gegOVbMNQwSzy5f68RsYLED27Y+ZHwKwyAk04mgETJjqsAWi8v...
6	36997868	1	0	NULL	eJ2nFYwvNG82dlfclNBHxufB1z6psJwowBdLA+L6GdvfkGsq2PYzEF5rRQ2CXDaqD...
7	36997868	1	0	NULL	pJK0hAH80e3LF1zJuoTw36KNXON6RYJRwY+KuxKwPNFdpPa72ciuPb0vAipMQAR29...
8	36997868	1	0	NULL	jhVO7B3EpygkKX7WZhmPFTNswW3waRCj49gFwYT2X4TJU4R4r2pxunZ8MYxA9n...
9	36997865	NULL	1	NULL	Blmeti4KsrQR6uG7qF2U/UhXZYGiwaAaAoeKJCYNIE5/VPZ8RY8HL9BXvFcmdCbIv...
10	36997868	1	0	NULL	Z+j2vV5s9e/JAwM1Ze3sLibu79uRvaM1ISAupPURf6A0tkQUnXVBA+AIC4C0so2iN...
11	36997868	1	0	NULL	WTuxlncvrBfP04Y6lFXb24pR7ro7/hAhnPLBBwUMNj5v1NnOUGOyuM3a/8VdP28t...
12	36997865	NULL	1	NULL	xFU20kvjMw67xbnLPAF1Y0ut0EEkyKGfCjva6duPqmUkA8vtLC693vhiUmkNUz4jcw...
13	36997868	1	0	NULL	tah3XWTKUE0Ndr0sXGv1kSrlDRokcPJ/pQEdnPbFy17PTwqqw0H5g66DY9osiDyi27...

1 - 14 из 14

Перейти к: 1

UTF-8

Рисунок 4 – Фрагмент, показывающий структуру таблицы sms

Рассматривая проблему читаемости таблицы, мы заметили, что все сообщения имеют примерно одинаковую структуру (рис. 5) построения (последовательность “=” является завершением потока). Возможно, есть некий алгоритм, для работы которого это важно.

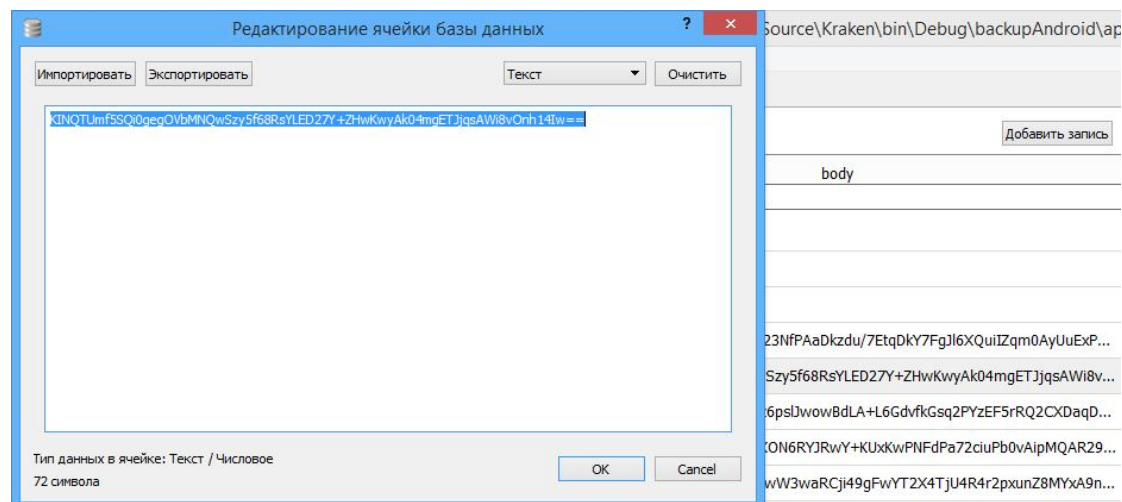


Рисунок 5 – Пример структуры сообщения в таблице sms

Исследование показывает следующее:

1. Базы данных мессенджеров в мобильных устройствах не зашифрованы, так что возможно составить запросы для автоматизированного съема критичной информации, что дает возможность получения несанкционированного доступа к данным пользователя устройства.
2. Есть взаимосвязь между номером телефона и идентификатором учетной записи Signal, однако данных о закрепленных за номерами персональных данных найдено не было.
3. Были найдены зашифрованные файлы вложений.
4. Содержание сообщений передаваемых пользователями зашифровано и (или) закодировано.

Чтобы извлечь информацию о сообщениях, необходимо составить следующий запрос для базы данных “messages.db” с использованием языка программирования SQL: “Select address, datetime(date/1000,'unixepoch'), type, body from sms order by date”.

Для получения информации о вложениях запрос для базы данных "messages.db" с использованием языка программирования SQL выглядит следующим образом: "Select recipient_ids, datetime(mms.date/1000,'unixepoch'), msg_box, body, ct, _data from mms left join part on mid = mms.id left join thread on thread_id = thread.id order by mms.date".

Чтобы получить информацию о телефонных номерах пользователя устройства, необходимо воспользоваться следующим скриптом для базы данных "canonical_address.db" с использованием языка программирования SQL: "Select _id, address from canonical_addresses".

Выводы. В погоне за выгодой и привлечением новых пользователей компании разработчики мессенджеров идут на хитрости, связанные с реализацией безопасности своих приложений; декларируют механизмы защиты, которые так или иначе заставляют пользователей чувствовать себя защищенными. Однако на самом деле все далеко не так.

На примере одного из «безопасных» мессенджеров мы продемонстрировали, что системы реализованы с нарушением целостности системы защиты данных. Функционирование механизмов происходит на открытых, доступных, программных инфраструктурах мобильных устройств: БД, средства передачи, журналы событий и т.д. В связи с этим дадим некоторые рекомендации по обеспечению безопасности мессенджеров для разработчиков:

- шифровать вложения мессенджера;
- переместить все данные из доступного для пользователя пространства памяти в закрытое хранилище приложения;
- использовать запутывающие названия файлов;
- шифровать критичные данные в базах данных (сообщения, путь к вложениям, информация о контактах и пр.);
- использовать дополнительный слой для шифрования критичных данных при условии включенной надстройки необходимости ввода парольной фразы при открытии приложения на смартфоне;
- шифровать непосредственно сами базы данных.

В дальнейших исследованиях мы вернемся к более подробному анализу каждого из представленных в сравнении мессенджеров, а также продолжим анализ механизмов и их реализаций на практике.

Библиографический список

1. Безопасность до блокировки доведет // Коммерсантъ. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3379658>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. Жданов О. Н. Методы и средства криптографической защиты информации / О. Н. Жданов, В. В. Золотарев. – Красноярск : Редакционно-издательский отдел СибГАУ, 2007. – 253 с.
3. Мессенджеры // Роскачество портал для умного покупателя. – Режим доступа: <https://rskrf.ru/ratings/tekhnologii/mobilnye-prilozheniya/mp-quot-messendzhery-quot>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
4. Самые защищенные мессенджеры // Spy-soft.net информационная безопасность на практике. – Режим доступа: <http://www.spy-soft.net/most-secure-messengers/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. Они читают ваши сообщения: как найти безопасный мессенджер // Internet UA. – Режим доступа: <http://internetua.com/oni-csitauat-vashi-soobsxeniya-kak-naiti-bezopasnyi-messendjer>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. A Deep Dive on End-to-End Encryption: How Do Public Key Encryption Systems Work? // SSD.EFF.ORG. – Режим доступа: <https://ssd.eff.org/en/module/deep-dive-end-end-encryption-how-do-public-key-encryption-systems-work>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
7. Technical Information // Signal. – Режим доступа: <https://signal.org/docs/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
8. Threema Gateway // Threema.Gateway. – Режим доступа: <https://gateway.threema.ch/en>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

References

1. Bezopasnost do blokirovki dovedet [Security will bring to blocking]. *Kommersant* [Businessman]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3379658>.
2. Zhdanov O. N., Zolotarev V. V. *Metody i sredstva kriptograficheskoy zashchity informatsii* [Methods and means of cryptographic information protection]. Krasnoyarsk, Editorial and Publishing Department of SibSAU, 2007.
3. Messendzhery [Messengers]. *Roskachestvo portal dlya umnogo pokupatelya* [Roskachestvo portal for a smart buyer]. Available at: <https://rskrf.ru/ratings/tekhnologii/mobilnye-prilozheniya/mp-quot-messendzhery-quot>.
4. Samye zashchishchennyye messendzhery [The most secure messengers]. *Spy-soft.net informatsionnaya bezopasnost na praktike* [Spy-soft.net information security in practice]. Available at: <http://www.spy-soft.net/most-secure-messengers/>.

5. Oni chitayut vashi soobshcheniya: kak nayti bezopasnyy messendzher [They read your messages: how to find a secure messenger]. *Internet UA*. Available at: <http://internetua.com/oni-csitauat-vashi-soobsxeniya-kak-naiti-bezopasnyi-messendjer>.

6. A Deep Dive on End-to-End Encryption: How Do Public Key Encryption Systems Work? *SSD.EFF.ORG*. Available at: <https://ssd.eff.org/en/module/deep-dive-end-end-encryption-how-do-public-key-encryption-systems-work>.

7. Technical Information. *Signal*. Available at: <https://signal.org/docs/>.

8. Threema Gateway. *Threema.Gateway*. Available at: <https://gateway.threema.ch/en>.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.144-164
УДК 681.2.088 + 004.2

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО ПОВОРОТНОГО СТЕНДА

Статья поступила в редакцию 10.09.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

Ермаков Роман Вячеславович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, кандидат технических наук, e-mail: roma-ermakov@yandex.ru

Серанова Анна Александровна, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, e-mail: seranova.anna@gmail.com

Львов Алексей Арленович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, e-mail: alvova@mail.ru

Калихман Дмитрий Михайлович, филиал ФГУП НПП – «ПО «Корпус», 410019, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Осипова, 1, доктор технических наук, e-mail: lidkalihman@yandex.ru

Гироскопические приборы находят широкое применение в различных областях техники. При их производстве применяются управляемые основания (стенды), задающие с высокой точностью и стабильностью угловые скорости, изменяющиеся по определенному закону. Создание подобных стендов является самостоятельной задачей, успешное решение которой во многом определяет прогресс в развитии инерциальной навигации. В статье описан метод, позволяющий произвести оценку угловой скорости платформы поворотного стенда для задания угловой скорости, оптимальную по критерию минимума среднего квадрата погрешности данной оценки, за счёт комплексирования информации с нескольких датчиков, в основе принципов измерения которых лежат различные физические законы. Приводятся выражения, позволяющие оценивать угловую скорость по методу максимального правдоподобия, основываясь на показаниях каждого из датчиков. Описан метод получения интегральной оценки угловой скорости платформы стенда. Проанализированы результаты имитационного моделирования описанного стенда, которые подтвердили целесообразность применения предлагаемой методики.

Ключевые слова: угловые измерения, погрешность, метод максимального правдоподобия, оптимальная оценка, тангенциальное и центростремительное ускорение, угловая скорость, полигауссовский закон распределения

METHOD FOR EVALUATING ANGULAR VELOCITY OF A PRECISION ROTARY TABLE

The article was received by the editorial board on 10.09.2019, in the final version – 25.11.2019.

Ermakov Roman V., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: roma-ermakov@yandex.ru

Seranova Anna A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, post-graduate student, e-mail:

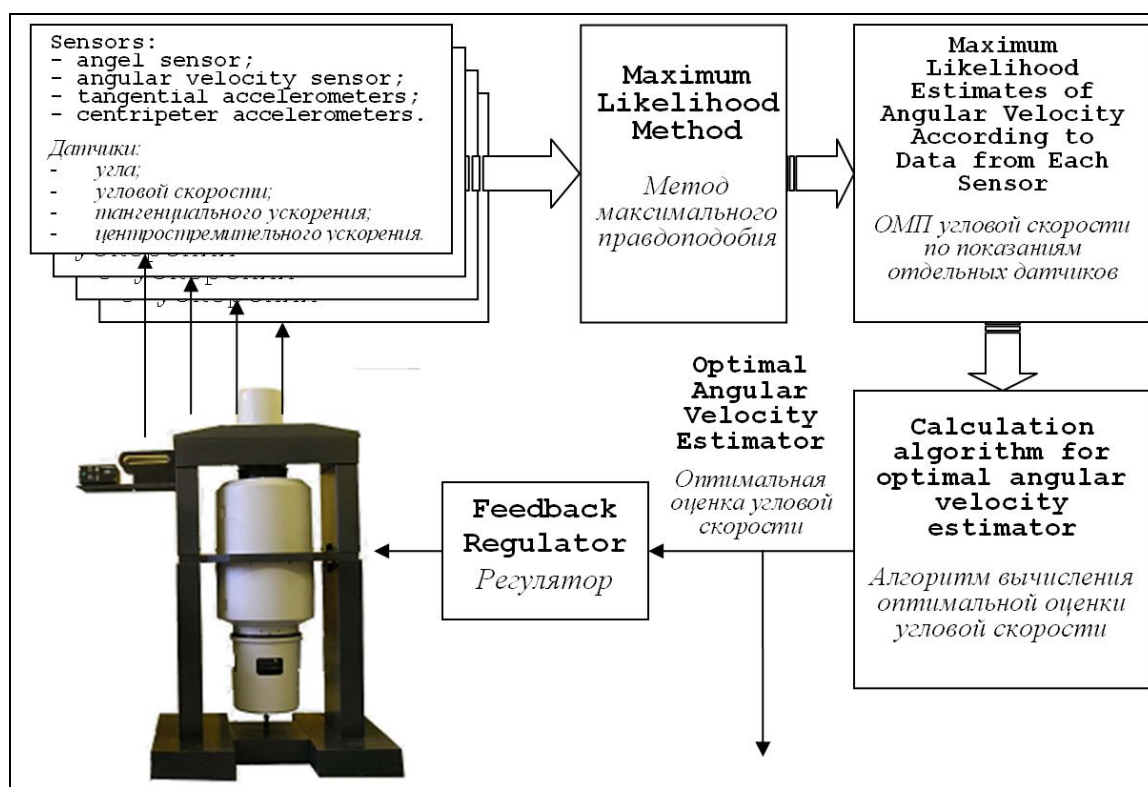
Lvov Aleksey A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: alvova@mail.ru

Kalikhman Dmitriy M., PC “Korpus”, Branch of FSUE N.A. Pilyugin “NPCAP”, 1 Osipov St., Saratov, 410019, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering)

Gyroscopic devices are widely used in various fields of technology. In their production, controlled bases (stands) are used, which specify with high accuracy and stability angular velocities that vary according to a certain law. The creation of such stands is an independent task, the successful solution of which largely determines the progress in the development of gyroscopic instrumentation. The article describes a method that allows estimating the angular velocity of the platform of the turntable for specifying the angular velocity, which is optimal by the criterion of the minimum mean square error of this estimate, due to the integration of information from several sensors based on the measurement principles of which various physical laws. Expressions are given that allow us to estimate the angular velocity using the maximum likelihood method, based on the readings of each of the sensors. A method for obtaining an integral estimate of the angular velocity of a bench platform is described. The results of simulation modeling of the described stand were analyzed, which confirmed the feasibility of applying the proposed methodology.

Key words: Angular measurements, optical angular sensor, angular velocity sensor, linear acceleration sensor, error, maximum likelihood method, tangential and centripetal acceleration, angular velocity, poly-Gaussian distribution law

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Гироскопические приборы находят широкое применение в системах ориентации морских объектов, авиационной, ракетно-космической техники, навигационных системах исследования состояния газо- и нефтепроводов, в инклинометрии, и т.п. При наладке и испытаниях прецизионных гироскопических приборов применяются управляемые основания (стенды), задающие с высокой точностью и стабильностью угловые скорости, изменяющиеся по определенному закону [2, 14, 16]. Создание подобных стендов является самостоятельной задачей, успешное решение которой в значительной степени влияет на прогресс в области инерциальной навигации [3, 17, 25, 28, 29].

Поворотные стенды, применяющиеся для испытаний гироскопических приборов, должны быть как минимум на порядок более точны, чем сами испытываемые приборы, а также соответствующие режимы контроля, т.е. возможность задавать угловую скорость, изменяющуюся по определенному закону.

Традиционно в основе конструкции поворотного стенда для воспроизведения угловой скорости лежит датчик угла [4, 29, 38, 42–43, 45, 46]. Главный недостаток данной схемы заключается в невозможности точного воспроизведения низких угловых скоростей: единицы – десятые доли градуса в час. Альтернативное решение, лишенное указанного недостатка, состоит в использовании в составе поворотного стенда инерциальных чувствительных элементов. Такие стенды описаны в работах [9, 15, 22, 23, 31, 36] и др. В упомянутых работах, как правило, не рассматриваются

вопросы получения оценки угловой скорости, оптимальной в смысле минимизации погрешности её измерения, с учетом информации с отдельных датчиков.

Цель данной статьи состоит в разработке метода повышения точности воспроизведения и измерения угловой скорости с помощью прецизионных поворотных стенов, включающих в свой состав инерциальные датчики и оптические датчики угла. Для этого разрабатываются математические модели погрешностей упомянутых датчиков, которые учитывают реальные их (погрешностей) распределения, методики и алгоритмы обработки измерительной информации, производящие оптимальную в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценки параметров указанных математических моделей и учитывающие информацию со всех датчиков, а также статистические свойства погрешностей датчиков.

Конструкция измерительного стенов. Как правило, конструктивно стенов состоит из поворотной платформы, электродвигателя, датчика угла и системы управления. Такие стенов не обеспечивают необходимую высокую точность воспроизведения малых угловых скоростей для контроля датчиков угловой скорости среднего и высокого классов точности [15, 16]. Одним из возможных способов улучшения точностных показателей является введение в конструкцию стенов инерциальных датчиков: акселерометров, выдающих информацию о тангенциальной и центростремительной составляющей линейного ускорения в точке их установки и гироскопов (датчиков угловой скорости, ДУС). Подобные стенов рассмотрены, например, в работах [11, 15, 23, 31, 36].

На рисунке 1 приведена обобщённая схема стенов, рассматриваемого в данной статье. В состав стенов входит датчик: угла (2), угловой скорости (ДУС) (4), тангенциальной (6) и центростремительной (7) составляющих линейного ускорения, расположенные на вспомогательной платформе (5), которая в свою очередь связана с основной платформой (1), где устанавливается испытуемый прибор (10) посредством жёсткого вала (3), закреплённого в прецизионных опорах (на рисунке не показаны).

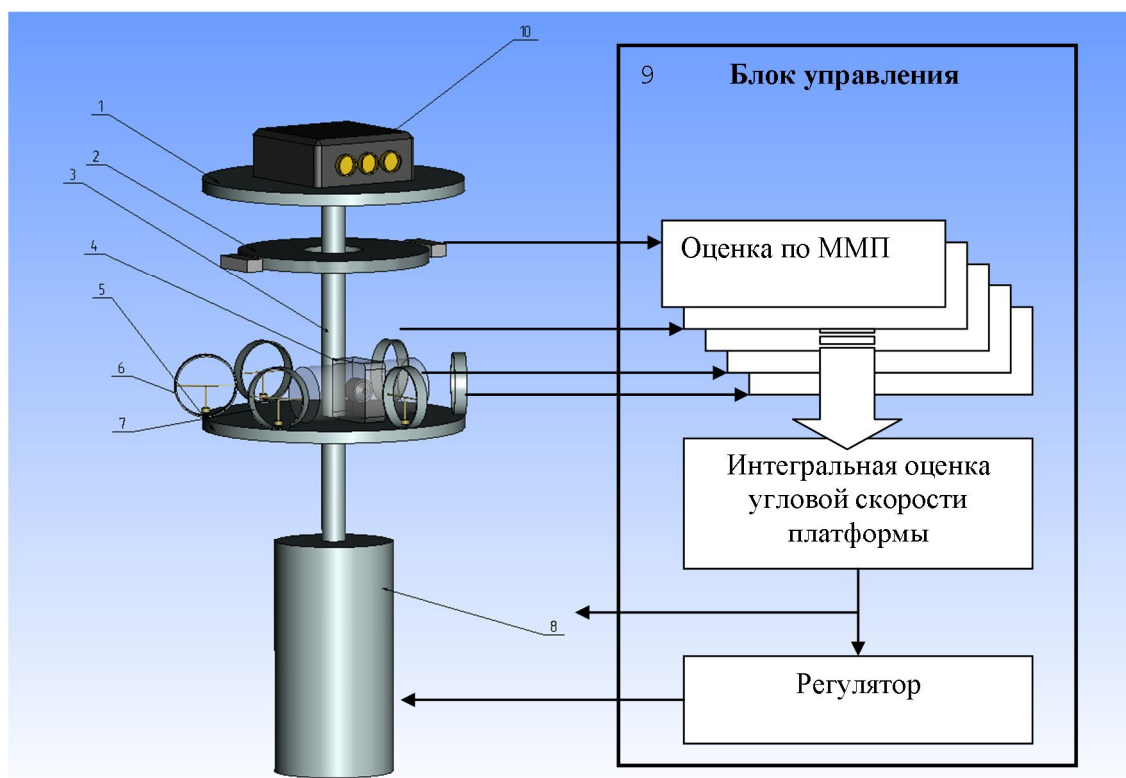


Рисунок 1 – Обобщённая схема стенов

Вал стенов приводится во вращение при помощи моментного двигателя (8), который контролирует блок управления (9). Информация с датчиков об угле, угловой скорости, тангенциальной и центростремительной составляющих ускорения поступает в регулятор блока управления, который вырабатывает в сигналы управления двигателем. Если используемые датчики имеют достаточную

полосу пропускания, а моментный двигатель – достаточную мощность, стенд способен поворачивать свою платформу с заданными угловой скоростью и угловым ускорением. При этом угловая скорость может изменяться по заданному закону.

Основное преимущество построения стенда по указанной схеме заключается в некоррелированности погрешностей измерений используемых датчиков, основанных на различных физических принципах измерения. Точность определения параметров движения во многом определяется тем, насколько хорошо известны значения параметров модели погрешности конкретного датчика.

В перечисленных ранее работах недостаточно внимания уделяется вопросу точности оценивания угловой скорости поворотной платформы стенда. В частности, в [15] проводится качественная оценка погрешностей, в [9, 18, 38] погрешность стенда отождествляется с погрешностью единственного датчика (ДУС либо датчика угла), по сигналу с которого производится управление приводом стенда. В работах, рассматривающих эталонные поворотные столы, например, [27, 29, 33, 35, 38, 44, 47], большое внимание уделено погрешностям воспроизведения и измерения углов. В контексте же достоверного воспроизведения и измерения малых угловых скоростей информация об угле разворота платформы носит второстепенный характер, поскольку недостаточная разрешающая способность современных датчиков угла не позволяет производить мгновенную оценку угловой скорости с необходимой точностью [13, 31]. В связи с вышесказанным данный метод измерения угловой скорости непригоден для высокоточного воспроизведения и измерения низких угловых скоростей, изменяющихся по определённому закону.

Поэтому основная задача статьи состоит в **нахождении оптимальной в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценки угловой скорости стенда**, представленного на рисунке 1. Далее полученная оценка используется в системе управления приводом стенда, а также в качестве результата измерения мгновенной скорости платформы. Помимо этого, во время определения оценки угловой скорости вычисляется её неопределенность.

Для того чтобы найти описанную выше оценку угловой скорости, авторами предложено использование классического метода максимального правдоподобия (ММП). Чтобы найти асимптотически эффективную оценку максимального правдоподобия (ОМП) требуется разработать модели погрешностей отдельных датчиков, входящих в состав стенда и проанализировать статистические свойства разработанных моделей погрешностей.

Ниже авторами будут получены выражения для оценок угловой скорости по информации от датчиков угла, угловой скорости (ДУС), тангенциального и центростремительного ускорений как функций угловой скорости вращения платформы стенда.

Оценка угловой скорости платформы по показаниям различных датчиков.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика угловой скорости. Традиционно статическая передаточная функция датчика угловой скорости принимается линейной [15]:

$$\hat{\omega}_r = M_{\omega_r} \omega + \zeta_{\omega_r}, \quad (1)$$

где $\hat{\omega}_r$ – оценка угловой скорости платформы, полученная по показаниям датчика угловой скорости; M_{ω_r} – масштабный коэффициент датчика; ω – истинное значение угловой скорости; ζ_{ω_r} – погрешность датчика. При этом считается, что математическое ожидание погрешности ζ_{ω_r} датчика угловой скорости ω_r^0 неизменно на протяжении всего измерения, но может изменяться от измерения к измерению. Необходимо отметить, что величина ω_r^0 изменяется от включения к включению датчика по случайному закону, т.е. сама представляет собой случайную величину, не обязательно имеющую нормальное распределение. Закон распределения данной случайной величины обусловлен конструкцией конкретного датчика. Однако производителям датчиков в процессе производства удобнее назначить диапазон граничных значений параметра ω_r^0 , не делая при этом предположений о характере его распределения. В статье авторами делается допущение о том, что величина ω_r^0 имеет равномерное распределение на интервале $[-d; d]$. Тогда, используя выражения для композиции законов распределения [24]:

$$p(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi_1) q(\eta - \xi_1) d\xi_1; \quad \eta = \xi_1 + \xi_2;$$

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right\};$$

$$q(\xi) = \begin{cases} 1/2d, & |\xi| \leq d \\ 0, & |\xi| > d \end{cases};$$

$$\xi_1 = \omega_r^0; \quad \xi_2 = \zeta_{\omega_r} - \omega_r^0;$$

$$\eta = \zeta_{\omega_r};$$

распределение плотности вероятности погрешности определения угловой скорости может быть представлено выражением:

$$p(\eta) = \int_{\eta-d}^{\eta+d} \frac{1}{2d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right\} d\xi, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение случайной величины ζ_{ω_r} .

В качестве решения уравнения (2) авторами было получено следующее выражение:

$$p(\eta) = \frac{1}{4d} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\eta+d}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\eta-d}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right], \quad (3)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция Лапласа.

На рисунке 2 представлены кривые $p(\eta)$ для некоторых значений d при неизменном σ . Видно, что при $d/\sigma \rightarrow 0$ форма кривой плотности вероятности распределения стремится к нормальному, а при $d/\sigma \rightarrow \infty$ – к равномерному. Значения d и σ , использованные авторами, были взяты из [15].

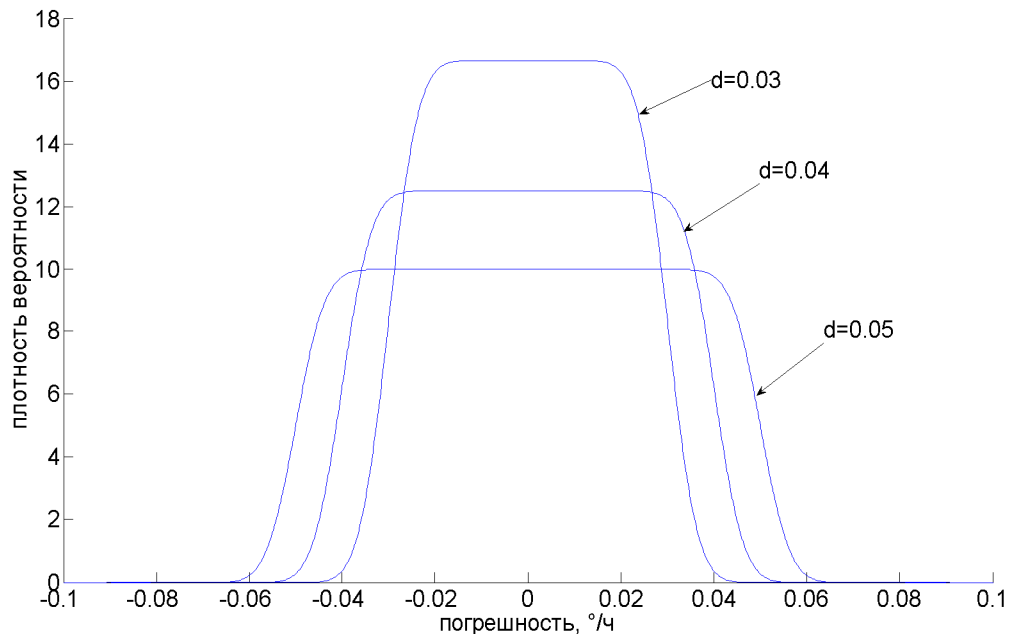


Рисунок 2 – Распределение плотности вероятности для различных значений d при фиксированном $\sigma = 0,003$

Погрешность оценки угловой скорости платформы, по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Тангенциальная составляющая линейного ускорения, измеряемая соответствующими датчиками (акселерометрами), равна: $a_\tau = \varepsilon r / g$, где a_τ – значение тангенциальной составляющей линейного ускорения; ε – угловое ускорение; r – радиус, соответствующий

ющий расстоянию между центром вращения и центром масс чувствительного элемента акселерометра; g – проекция силы тяжести на ось чувствительности акселерометра [15]. Оценку угловой скорости вращения платформы стенда по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения за интервал времени $T = t_n - t_{n-1}$:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g}{K_\tau^r \cdot r} \hat{a}_\tau dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (4)$$

где T – период интегрирования, а коэффициент K_τ^r описывает неточность установки датчика.

Запишем измеряемую датчиком величину ускорения $\hat{a}_\tau$ в виде:

$$\hat{a}_\tau = M_\tau a_\tau + \zeta_{a_\tau} \quad (5)$$

где a_τ – истинное значение тангенциальной составляющей линейного ускорения; ζ_{a_τ} – случайная составляющая погрешности; M_τ – масштабный коэффициент датчика. Тогда можем представить (4) в следующем виде:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g(M_\tau a_\tau + \zeta_{a_\tau})}{K_\tau^r \cdot r} dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (6)$$

Будем считать, что конструкция стенда абсолютно жёсткая, вследствие чего K_τ^r – постоянная, тогда можем вынести множитель $g/(K_\tau^r \cdot r)$ из-под интеграла. Представим $M_\tau = M_\tau^* + \Delta M_\tau$, где M_τ^* – «идеальный»¹ масштабный коэффициент; ΔM_τ – погрешность масштабного коэффициента, получим:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} \int_{t_{n-1}}^{t_n} g(M_\tau^* a_\tau + \Delta M_\tau a_\tau + M_\tau^* \zeta_{a_\tau} + \Delta M_\tau \zeta_{a_\tau}) dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}]. \quad (7)$$

Слагаемым $\Delta M_\tau \zeta_{a_\tau}$ в выражении (7) можно пренебречь из-за малости сомножителей. Представим $\zeta_{a_\tau} = a_\tau^0 + \zeta_{a_\tau}^r$ где a_τ^0 – математическое ожидание случайной составляющей показаний датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Считаем, как и прежде, величину a_τ^0 неизменной в течение времени измерения, но изменяющейся от измерения к измерению случайным образом. Погрешность $\zeta_{a_\tau}^r$ – случайная величина с гауссовым законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Учитывая вышеизложенное, запишем:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} \int_{t_{n-1}}^{t_n} g(M_\tau^* a_\tau + \Delta M_\tau a_\tau + M_\tau^* a_\tau^0 + M_\tau^* \zeta_{a_\tau}^r) dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (8)$$

Учитывая, что в (8) $M_\tau^* a_\tau$, $\Delta M_\tau a_\tau$, $M_\tau^* a_\tau^0$ не зависят от времени, окончательно можем записать:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (9)$$

где ω – истинная угловая скорость платформы, а величина $\omega_\tau^0 = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r} dt = \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}$ пред-

ставляет собой постоянную составляющую погрешности оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Видно, что величина ω_τ^0 не зависит от времени интегрирования. Также нетрудно заметить, что обе составляющие погрешности обратно пропорциональны радиусу. Обусловленная постоянной составляющей погрешность будет накапливаться в процессе интегрирования, в связи с чем требуется периодически корректировать текущее значение оценки угловой скорости по информации от других датчиков.

¹ Здесь и далее под «идеальным» значением параметра будем понимать такое значение, которое было бы у данного параметра (масштабного коэффициента, частоты генератора и т.д.) в случае, когда погрешности отсутствуют. Иными словами, это значение, указанное в паспорте прибора.

Далее произведём оценку влияния неустойчивости задающего генератора на точность оценивания угловой скорости платформы стенда по сигналу датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Период дискретности по времени алгоритма может быть представлен в виде:

$$T = N_{3Г} / f_{3Г} = N_{3Г} / (M_{3Г} f_0 + \zeta_T), \quad (10)$$

где T – период дискретности алгоритма по времени; $N_{3Г}$ – число тактов генератора в течение одного периода; $f_{3Г}$ – истинное значение частоты задающего генератора; $M_{3Г}$ – погрешность задающего генератора; f_0 – «идеальное» значение частоты задающего генератора; ζ_T – случайная составляющая погрешности задающего генератора (обусловлена джиттером). Ввиду того, что число тактов $N_{3Г}$ велико, а величина ζ_T имеет нулевое математическое ожидание, будем считать $\zeta_T = 0$. В этом случае можно представить (10) в виде:

$$T = N_{3Г} / M_{3Г} f_0 = T_0 / M_{3Г} \quad (11)$$

где T_0 – «идеальная» величина периода дискретности алгоритма.

Подставив (11) в (9), получаем:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] = & \frac{M_\tau^* M_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau M_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{M_{3Г}}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \\ \omega_\tau^0 = & \frac{g M_\tau^* M_{3Г} a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}. \end{aligned} \quad (12)$$

Представляя $M_{3Г}$ в виде $M_{3Г} = 1 + \Delta_{3Г}$, где $\Delta_{3Г}$ – абсолютная величина погрешности частоты задающего генератора, запишем предыдущее выражение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] = & \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{M_\tau^* \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \\ & + \frac{1 + \Delta_{3Г}}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\omega_\tau^0 = \frac{g M_\tau^* (1 + \Delta_{3Г}) a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}.$$

Современные кварцевые генераторы имеют погрешность частоты в пределах $10^{-5} \div 10^{-8}$ от номинального значения; рубидиевые и цезиевые стандарты имеют погрешности в диапазоне $10^{-8} \div 10^{-11}$ [5, 6, 8, 10, 27, 30, 40]. Учитывая это, приближённо запишем:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] \cong & \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{M_\tau^* \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{1}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \\ \omega_\tau^0 \cong & \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из приведённых выше выражений видно, что эффекты, обусловленные неустойчивостью частоты генератора стенда, выражаются в смещении оценки угловой скорости, причём величина данного смещения пропорциональна измеряемой угловой скорости. В случае использования рубидиевых либо цезиевых стандартов частоты данной погрешностью можно пренебречь. При использовании кварцевого генератора и погрешности масштабного коэффициента стенда $0,001 \% \div 0,0001 \%$ указанную погрешность нужно учитывать.

Аналогично погрешности датчика угловой скорости будем считать, что величина a_τ^0 неизменна в течение измерения, но изменяется от измерения к измерению. Тогда плотность вероятности погрешности оценки угловой скорости по информации от датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения будет распределена аналогично датчику угловой скорости и по форме совпадёт с выражением (3), хотя значения параметров распределения будут иметь другой физический смысл.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика центростремительной составляющей линейного ускорения. В [15] приводится выражение для центростремительной составляющей линейного ускорения, действующего на расстоянии r от оси вращения платформы поворотного стенда:

$$a_y = \omega^2 r / g. \quad (15)$$

Запишем выражение для оценки угловой скорости вращения поворотной платформы стенда по сигналу от датчика центростремительной составляющей линейного ускорения:

$$\hat{\omega}_u = \sqrt{\frac{a_u g}{r}} = \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \left(\omega - \sqrt{\frac{g(\zeta_{a_u}^r + a_u^0)}{r}} \right), \quad (16)$$

где $\hat{a}_u$ – показания датчика центростремительной составляющей линейного ускорения; a_u – «истинная» величина центростремительной составляющей линейного ускорения; M_u^* – «идеальное» значение масштабного коэффициента датчика; ΔM_u – погрешность масштабного коэффициента датчика; a_u^0 – постоянная составляющая погрешности датчика; $\zeta_{a_u}^r$ – случайная величина с гауссовым законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Считаем, как и прежде, величину a_u^0 неизменной в течение времени измерения, но изменяющейся от измерения к измерению случайным образом.

Разложив величину $\sqrt{g(\zeta_{a_u}^r + a_u^0)}/r$ в ряд Тейлора относительно $\zeta_{a_u}^r$, можем приближённо представить (16) как:

$$\hat{\omega}_u \cong \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \omega - \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \frac{g}{r} a_u^0 - \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \frac{g}{r} \frac{1}{4a_u^0} \zeta_{a_u}^r. \quad (17)$$

В дальнейшем будем использовать данную линеаризованную оценку при получении оценки угловой скорости платформы стенда методом максимального правдоподобия.

Так же как в случае с датчиком тангенциальной составляющей линейного ускорения, плотность вероятности погрешности оценки угловой скорости по показаниям датчика центростремительной составляющей линейного ускорения будет распределена аналогично датчику угловой скорости и по форме совпадёт с выражением (3), хотя значения параметров распределения будут иметь другой физический смысл.

Погрешность датчика угла. В [11, 13] приводится выражение для полной погрешности оптического датчика угла, основанное на физическом принципе действия данного датчика и описывающее, как возникают отдельные составляющие данной погрешности. Как правило, физические величины, которые вызывают эту погрешность, не доступны для измерения. Поэтому анализ и компенсация погрешности оптического датчика удобнее производить с использованием представления его погрешности в следующем виде [13]:

$$\Delta\alpha(\alpha) = \Delta\alpha_0(\alpha) + \Delta\alpha_\zeta, \quad (18)$$

где величины $\Delta\alpha_0(\alpha)$ и $\Delta\alpha_\zeta$ представляют систематическую и случайную составляющие погрешности датчика угла, причём дисперсия случайной составляющей $\sigma^2(\Delta\alpha_\zeta, \alpha)$ есть функция измеряемого угла α .

Экспериментальные данные, приведенные в [12, 13], свидетельствуют о несоответствии закона распределения плотности вероятности погрешности датчика угла гауссовому закону распределения. На рисунке 3 приводятся погрешности одного из исследованных датчиков угла, а на рисунке 4 – гистограмма распределения приведенных на рисунке 3 погрешностей для угла разворота призмы 210° .

В [12, 20] предлагается методика аппроксимации апостериорной плотности вероятности вектора оцениваемых параметров системы с помощью выпуклой комбинации гауссовых плотностей вероятности. Кратко изложим её суть.

Обозначим через $\mathbf{Y}$ вектор выходных измерений модели, $\mathbf{X}$ – вектор параметров модели, тогда

$$\mathbf{Y} = h(\mathbf{X}, \mathbf{\Xi}),$$

где $h(\bullet)$ – передаточная функция; $\mathbf{\Xi}$ – погрешность измерений. Алгоритм аппроксимирует априорную область изменения оцениваемых параметров модели комбинацией гауссовых распределений:

$$p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot N_x\{\mathbf{\mu}_i, \gamma_i\}, \quad (19)$$

где $N_x\{\mathbf{\mu}_i, \gamma_i\} = \left(1/\sqrt{(2\pi)^n \det \gamma_i}\right) \cdot \exp\left\{\left[\mathbf{x} - \mathbf{\mu}_i\right]^T \cdot \gamma_i^{-1} \cdot \left[\mathbf{x} - \mathbf{\mu}_i\right]\right\}$, γ_i – корреляционная матрица вектора

$\mathbf{x}$, а неотрицательные коэффициенты ρ_i удовлетворяют условию $\sum_{i=1}^N \rho_i = 1$.

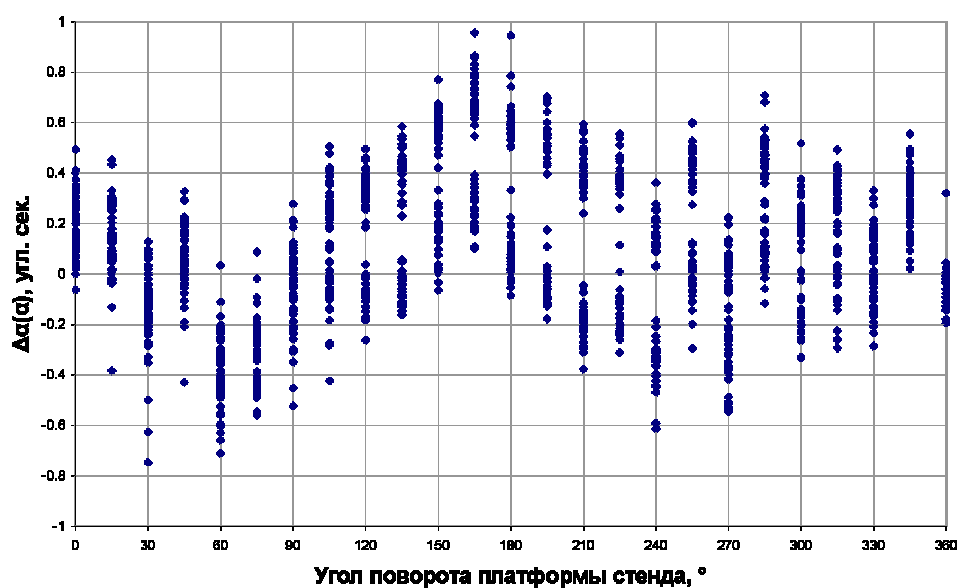


Рисунок 3 – Погрешности бесконтактного оптического датчика угла

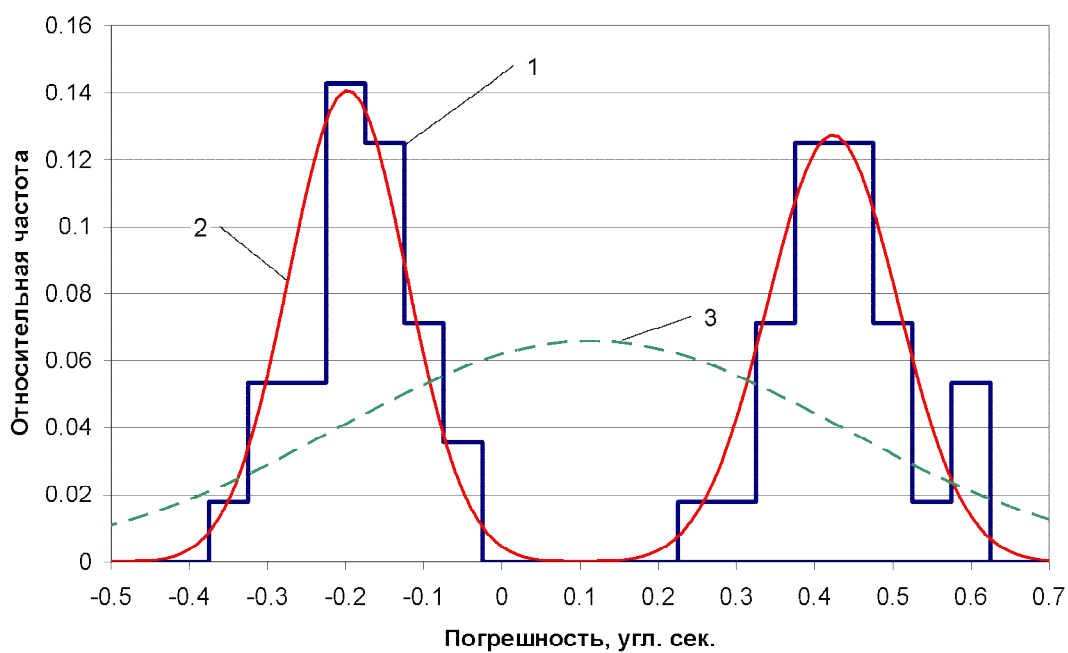


Рисунок 4 – Гистограмма распределения относительных частот погрешностей, приведенных на рисунке 3 для угла разворота призмы 210° (1), их аппроксимация по полигауссовскому (2) и нормальному закону распределения

В [12] приводится выражение для апостериорной плотности вероятности:

$$p(x|y) = \sum_{i=1}^N u_i \cdot N_x\{\hat{\mu}_i, \hat{\gamma}_i\}, \quad u_i = \frac{\alpha_i \cdot N_y\{\mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}, \hat{\mathbf{W}}_i\}}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot N_y\{\mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}, \hat{\mathbf{W}}_i\}}. \quad (20)$$

N_y определяется аналогично N_x (см. выше). Тогда

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{W}}_i &= \mathbf{W} + \mathbf{A}_i \cdot \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T, \\ \hat{\boldsymbol{\mu}}_i &= \boldsymbol{\mu} + \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{a}_i - \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}), \\ \hat{\gamma}_i &= \gamma_i - \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \cdot \mathbf{A}_i \cdot \gamma_i,\end{aligned}\quad (21)$$

где $\mathbf{Y} \approx \mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x} + \mathbf{G}_i \cdot \boldsymbol{\Xi}$, $\mathbf{W}_i = \mathbf{G}_i \cdot \mathbf{G}_i^T$ – разложение в ряд Тейлора функции $h(\bullet)$ в окрестности i -го пика. Введём обозначения:

$$\mathbf{a}_i = h(\boldsymbol{\mu}_i, 0) - \nabla_x h(\boldsymbol{\mu}_i, 0) \cdot \boldsymbol{\mu}_i, \quad \mathbf{A}_i = \nabla_x h(\boldsymbol{\mu}_i, 0), \quad \mathbf{G}_i = \nabla_{\boldsymbol{\xi}} h(\boldsymbol{\mu}_i, 0).$$

Произведя обработку вектора выходных измерений по алгоритму, который был описан в [12, 20], можно получить оценку, оптимальную в смысле минимума среднего квадрата ошибки:

$$\mathbf{m} = M\{\mathbf{X}|\mathbf{Y} = \mathbf{y}\} = \int \mathbf{x} \cdot p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \cdot d\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N u_i \cdot \int \mathbf{x} \cdot N_x\{\hat{\boldsymbol{\mu}}_i, \hat{\gamma}_i\} \cdot d\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N u_i \cdot \hat{\boldsymbol{\mu}}_i. \quad (22)$$

Из рисунка 4 видно, что предлагаемая модель позволяет более точно описать экспериментальные данные.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика угла. Поскольку рассматриваемый в работе датчик угла является дискретным датчиком, угловая скорость по его показаниям может быть найдена с использованием выражения:

$$\hat{\omega}_{ДУ} = (\alpha[n] - \alpha[n-1]) / T, \quad (23)$$

где T – период дискретности алгоритма по времени; $\alpha[n]$ – показания датчика угла в момент времени n . Пусть оценка угла, полученная по информации от датчика угла, представлена выражением:

$$\hat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha_0(\alpha) + \Delta\alpha_{\zeta}, \quad (24)$$

где $\hat{\alpha}$ – оценка угла; $\Delta\alpha_0(\alpha)$ – систематическая составляющая погрешности датчика угла; $\Delta\alpha_{\zeta}$ – случайная составляющая погрешности датчика угла; α – истинное значение угла.

Тогда можем представить оценку угловой скорости по информации с датчика угла в виде:

$$\hat{\omega}_{ДУ} \cong \omega + \Delta_{3T}\omega + \frac{(\Delta\alpha_0(\alpha[n]) - \Delta\alpha_0(\alpha[n-1]))}{\Delta\alpha} \omega + \frac{\Delta\alpha_{\zeta}}{T_0}. \quad (25)$$

Современные бесконтактные оптические датчики угла имеют случайную составляющую погрешности на уровне десятых долей угловой секунды [12, 13, 17]. Следовательно, если период дискретности алгоритма измерения угловой скорости составляет 1 мс, случайная составляющая погрешности угловой скорости составит сотни угловых секунд за секунду (градусов в час); а если период дискретности составляет 10 мс – десятки градусов в час.

В связи с этим авторы считают невозможным непосредственное использование датчика угла для управления прецизионным поворотным стендом.

Оптимальное оценивание угловой скорости платформы поворотного стенда методом максимального правдоподобия. Ранее было показано несоответствие законов распределения погрешностей показаний датчиков, которые входят в состав стенда, нормальному закону распределения. В связи с этим использование МНК для определения оценки угловой скорости по информации от совокупности входящих в состав стенда датчиков некорректно. Находить оптимальную в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценку при известных плотностях распределения погрешности измерений авторами предлагается методом максимального правдоподобия (ММП) [7, 19, 33].

Обозначим измеряемые выходные значения датчиков y_k . Тогда

$$y_k = M_k g_k(\omega_k) + \xi_k = M_k g_k(\omega_k) + (\zeta_k + \xi_k^0), \quad (26)$$

где ω – истинная угловая скорость поворотной платформы стенда; $g(\omega)$ – передаточная функция датчика; M – масштабный коэффициент датчика; ξ – значение аддитивной погрешности датчика, являющейся суммой систематической ξ^0 и случайной ζ составляющих, $k = 1 \dots m$ – номер измерительного канала. Оценка угловой скорости по данным с k -го измерительного канала:

$$\tilde{\omega}_k = f_k(y_k, z_1, z_2, z_3, \dots), \quad (27)$$

где функция $f_k(y_k, z_1, z_2, z_3, \dots)$ для ДУС определяется выражением (1), для датчика угла – выражением (25), а для датчиков тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения – выражениями (14) и (17) соответственно.

Нахождение итоговой оценки угловой скорости $\tilde{\omega}_{ML}$ по ММП требует определения ОМП для всех измерительных каналов поворотного стенда. Далее для каждого измерительного канала построим систему нормальных уравнений. Для простоты пока полагаем масштабные коэффициенты M_k постоянными и известными.

В [11] было показано, что плотность вероятности погрешности показаний в каналах датчика угла, центростремительной и тангенциальной составляющих линейного ускорения распределена в соответствии с (3), а распределение плотности вероятности погрешности показаний датчика угла может быть описано с использованием полигауссовской аппроксимации (22).

Обозначим $x_k = g_k(\omega_{ki})$, тогда можем представить (26) в виде:

$$\xi_{ki} = y_{ki} - M_k x_k. \quad (28)$$

Будем полагать все погрешности ξ_{ki} некоррелированными вследствие того, что соответствующие датчики имеют различную физическую природу. Тогда можно выписать выражения для систем нормальных уравнений у каждого отдельного измерительного канала стенда.

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям ДУС. На основании (3), а также учитывая, что $x = \omega$, запишем выражение для совместной плотности вероятностей выборки из N значений угловой скорости, измеренных с помощью ДУС:

$$W_N = \prod_{i=1}^N \frac{1}{4d} \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) =$$

$$\left(\frac{1}{4d} \right)^N \prod_{i=1}^N \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) \rightarrow \max$$

Прологарифмируем эту функцию правдоподобия [16]:

$$L(\omega) = \ln(W_N) = \ln \left\{ \left(\frac{1}{4d} \right)^N \prod_{i=1}^N \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) \right\} =$$

$$= N \ln \left(\frac{1}{4d} \right) + \sum_{i=1}^N \ln \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right). \quad (29)$$

Выражение (29) есть функция двух переменных: ω и σ . Оценка ω даст нам угловую скорость, которая будет использована в итоговой оценке, а величина σ характеризует достоверность оценки угловой скорости каждым конкретным датчиком и определяет дисперсию погрешности оценивания. Значение дисперсии определяет вес каждой оценки ω в итоговом выражении оценки угловой скорости по результатам измерения совокупностью датчиков.

Определение максимума выражения (29) производится нахождением нулей её частных производных по ω и σ .

$$\frac{dL(\omega, \sigma)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_\omega \left(\exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{2\sigma_i^2} \right) - \exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right)}{\sqrt{\pi}\sigma \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right)} = 0; \quad (30)$$

$$\frac{dL(\omega, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{\sigma_i^2} \right) (y_i - M_\omega \omega - d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} -$$

$$- \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{\sigma_i^2} \right) (y_i - M_\omega \omega + d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} = 0. \quad (31)$$

Выражения (30) и (31) нелинейные, и аналитическое решение полученной системы нормальных уравнений невозможно. Для решения системы нормальных уравнений авторами использовались численные методы [33]. В качестве начальных приближений были использованы следующие величины [33]:

$$\omega_{k0} = \sum_{i=1}^N y_i / N_k M_k, \sigma_{0k}^2 = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (y_i - \bar{y})^2, \bar{y} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} y_{ki}, (i = \overline{1, N_k}), \quad (32)$$

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям датчиков тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения. Аналогично ДУС, для данных датчиков находятся ОМП соответствующих составляющих ускорения и их стандартные отклонения путём численного решения систем нормальных уравнений (33) и (34):

$$\frac{dL(\omega)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_\omega \left(\exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) - d)^2}{2\sigma_i^2}\right) - \exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) + d)^2}{2\sigma_i^2}\right) \right)}{\sqrt{\pi} \sigma_i \left(\operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) + d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) - d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] \right)} \cdot \frac{dg_k(\omega_k)}{d\omega} = 0; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL(\omega, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_\omega \omega - d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} - \\ - \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_\omega \omega + d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} = 0, \end{aligned} \quad (34)$$

где k – номер канала измерения; N_k – объём выборки.

Как и ранее, в качестве начальных приближений используются величины:

$$\omega_{k0} = g^{-1} \left(\sum_{i=1}^N y_{ki} / N_k M_k \right), \sigma_{0k}^2 = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (y_{ki} - \bar{y}_k)^2, \bar{y}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} y_{ki}, (k = \overline{1, 4}), (i = \overline{1, N_k}), \quad (35)$$

а соответствующие оценки угловой скорости определяются подстановкой найденных ОМП составляющих ускорения в выражения (16) и (4).

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по информации с датчика угла. Для получения оптимальной ОМП по информации с датчика угла авторами на основании выражения (25) была получена следующая система нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} W_N = \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \\ L(\alpha) = \ln(W_N) = \ln \left(\prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \right) = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \right) \\ \frac{dL}{d\alpha} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j (y_i - \alpha) \exp\left\{ -\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2} \right\}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{ij}^3}}{\sum_{j=1}^R \rho_j \frac{\exp\left\{ -\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2} \right\}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{ij}}} = 0. \quad (36) \\ \frac{dL(\alpha, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \frac{\rho_i \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\} (2\pi)^N \left(\frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \det(\sigma_{ij}) \right)}{\left(\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})} \right)^3} + \frac{\rho_i (y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha) \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})} \sigma_{ij}^2} \right) \\ \frac{dL(\alpha, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_i \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}}}{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_i \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}}} \end{aligned} \quad (37)$$

Как и ранее, оценки $\hat{\alpha}$ и σ из (36), (37) находятся с использованием численных методов. Далее, подставив оценку $\hat{\alpha}$ в выражение (25), найдём оценку угловой скорости поворотной платформы стенда.

Методика оценки масштабных коэффициентов датчиков. Истинные значения масштабных коэффициентов M_k , как правило, точно не известны и изменяются во время измерений. Для их уточнения авторами предлагается следующая методика.

Пусть «идеальное» значение масштабного коэффициента любого из рассматриваемых датчиков равно $M_\omega^* = M_\omega + \Delta M_\omega$. Тогда для датчика угловой скорости выражение (26) можно переписать так:

$$y_j = M_\omega \omega + \Delta M_\omega \omega + M_\omega \xi_{\omega j} + \Delta M_\omega \xi_{\omega j}, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (38)$$

Величина M_ω известна, а малая поправка ΔM_ω – неизвестна. Последним членом в (38) можно пренебречь, ввиду малости ΔM_ω и $\xi_{\omega j}$. Полученное уравнение является нелинейным, так как в нем присутствует произведение неизвестных параметров ω и ΔM_ω . Для вычисления их оценок авторами предлагается следующий подход.

Сначала будем полагать, что величина масштабного коэффициента известна точно и равна M_ω . Тогда (38) можно представить в виде:

$$y_j = M_\omega \omega + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (39)$$

Из системы уравнений (39) определяется оценка угловой скорости по описанной выше методике. Далее вычисляется результирующая оценка угловой скорости ω (по методике, которая будет приведена далее). Обозначим найденную оценку ω_0 . Далее считаем истинную угловую скорость равной $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, а истинное значение масштабного коэффициента равно $M_\omega^* = M_\omega + \Delta M_\omega$. С учётом этого перепишем (39) в виде:

$$y_j = M_\omega \omega_0 + M_\omega \Delta\omega + \Delta M_\omega \omega_0 + \Delta M_\omega \Delta\omega + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (40)$$

Пренебрегая членом $\Delta M_\omega \Delta\omega$ ввиду его малости, получим систему линейных относительно неизвестных $\Delta\omega$ и ΔM_ω уравнений:

$$y_j = M_\omega \omega_0 + M_\omega \Delta\omega + \Delta M_\omega \omega_0 + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (41)$$

Система (41) решается повторно по ММП относительно величин $\Delta\omega$ и ΔM_ω . Данная процедура выполняется для всех измерительных каналов, после чего вновь находится результирующая оценка угловой скорости. Процедура выполняется итерационно вплоть до достижения необходимой точности.

Методика определения угловой скорости платформы поворотного стенда. Упрощённая информационно-логическая схема определения угловой скорости платформы поворотного стенда по информации от входящих в его состав датчиков приведена на рисунке 5.

Предлагаемая авторами методика состоит из двух этапов, на первом из которых выполняется калибровка стенда, после выполнения которой стенд может воспроизводить и измерять угловую скорость (второй этап). Предполагается, что систематическая составляющая погрешности датчика угла $\Delta\alpha_0(\alpha)$, а также погрешность задающего генератора $M_{3Г}$ известны до начала калибровки поворотного стенда.

1. Платформа стенда фиксируется, измеряются средние значения величин $\zeta_{\omega Г}$, a_u^0 , a_r^0 . Полученные значения позже будут использованы как начальные приближения.

2. Производится разворот платформы с наперед заданными угловыми скоростями ω_i , $i = 1, \dots, M$ на фиксированные углы α_i . Угловое положение платформы во время движения выбирается таким образом, чтобы случайная составляющая погрешности $\Delta\alpha_\zeta$ была пренебрежимо малой (желательно производить движение платформы в диапазонах угловых положений, в которых СКО погрешности мало – области, не заштрихованные на рисунке 6, где в качестве примера представлены экспериментальные данные погрешности датчика угла). Длительности разворотов T_i фиксируется.

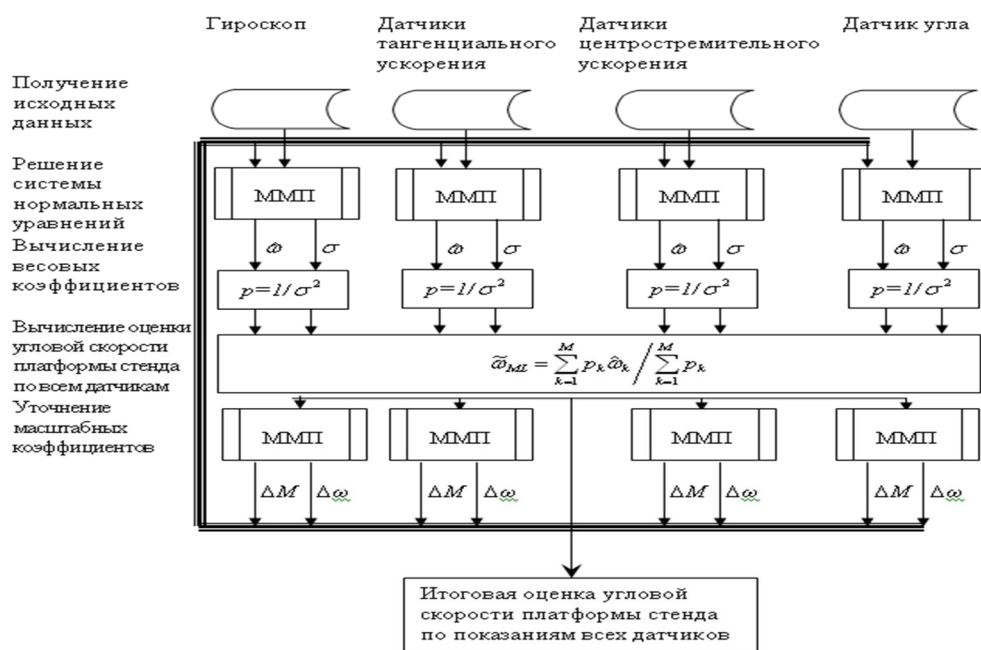


Рисунок 5 – Упрощенная информационно-логическая схема определения угловой скорости платформы поворотного стенда по показаниям совокупности датчиков различной физической природы (второй этап)

3. Для каждого датчика с помощью взвешенного МНК [33] находится масштабный коэффициент M_k :

$$M_k = \sum_{i=1}^M \omega_i (\tilde{\omega}_{ki} - \xi_k^0) / \sum_{i=1}^M \omega_i^2, \quad \omega_i = \frac{\alpha_i}{T_i},$$

где в качестве ξ_k^0 используются значения, определенные на первом этапе.

На этом калибровка заканчивается. Во время эксплуатации стенда:

4. По ММП для каждого датчика определяется оценка угловой скорости $\hat{\omega}_k$ и дисперсия σ_k^2 .

5. Вычисляются весовые коэффициенты p_k как величины, обратные дисперсиям: $p_k = 1/\sigma_k^2$.

6. Окончательная оценка угловой скорости определяется как средневзвешенная [17, 21]:

$$\tilde{\omega}_{ML} = \sum_{k=1}^M p_k \hat{\omega}_k / \sum_{k=1}^M p_k, \quad (42)$$

где $\hat{\omega}_k$ – ОМП, полученная по данным с k -го измерительного канала.

На рисунках 7, 8 и 9 приведены результаты численного моделирования динамики поворотно-го стенда. При этом на рисунке 7 оценка угловой скорости платформы вычисляется как среднее арифметическое оценок отдельных датчиков, на рисунке 8 – по методу переключения, предложенному в [15], на рисунке 9 – в соответствии с предложенной авторами методикой.

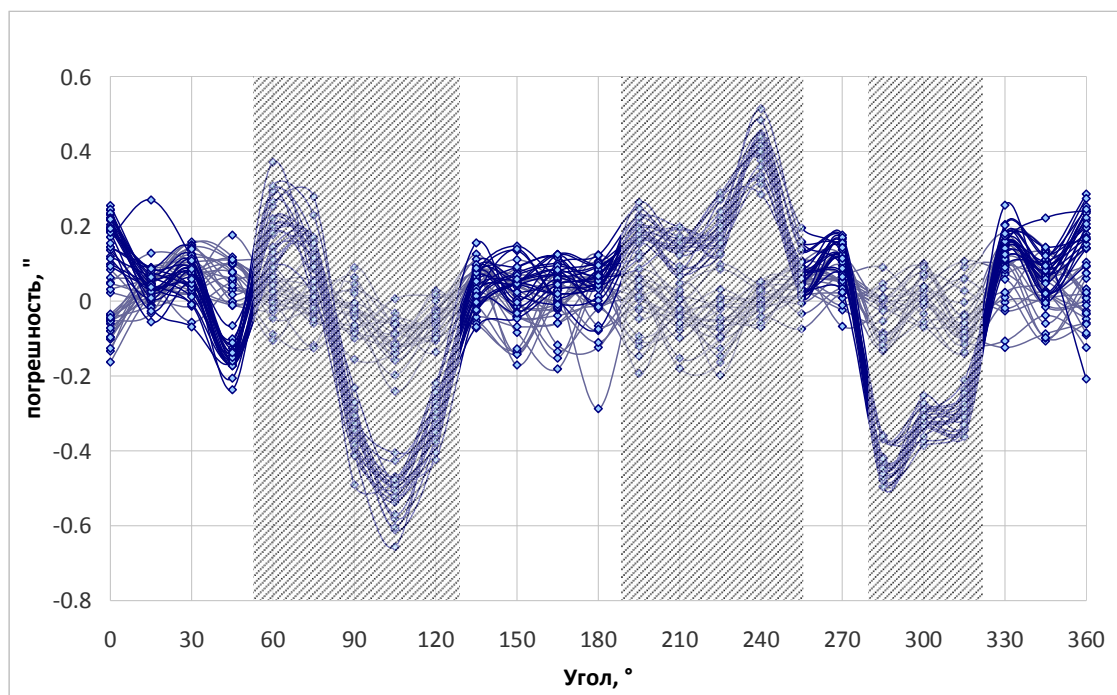


Рисунок 6 – Выбор областей для калибровки датчиков

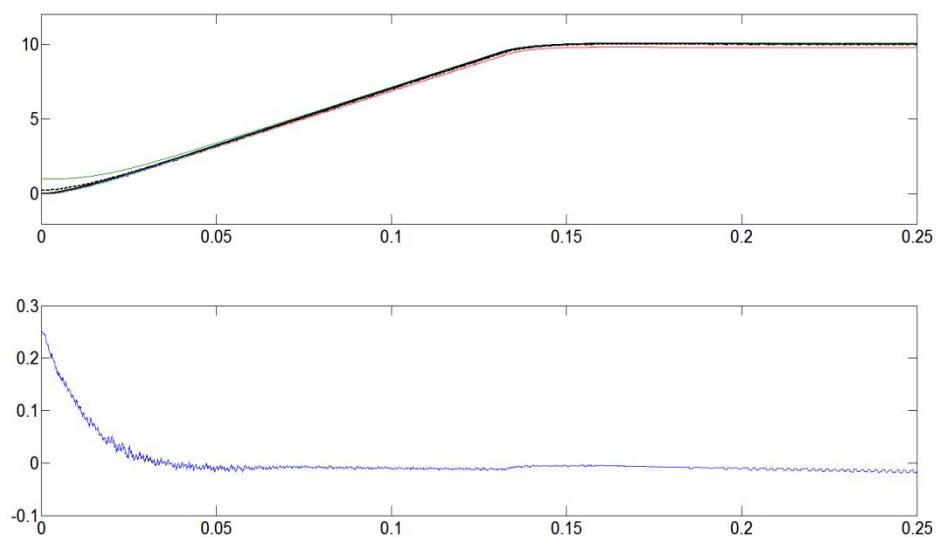


Рисунок 7 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется как среднее арифметическое отдельных оценок

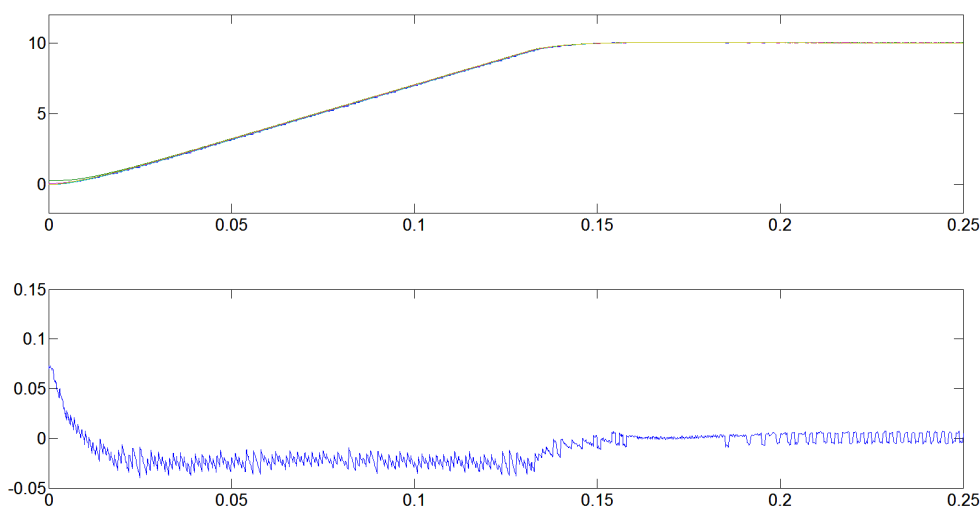


Рисунок 8 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется по МНК

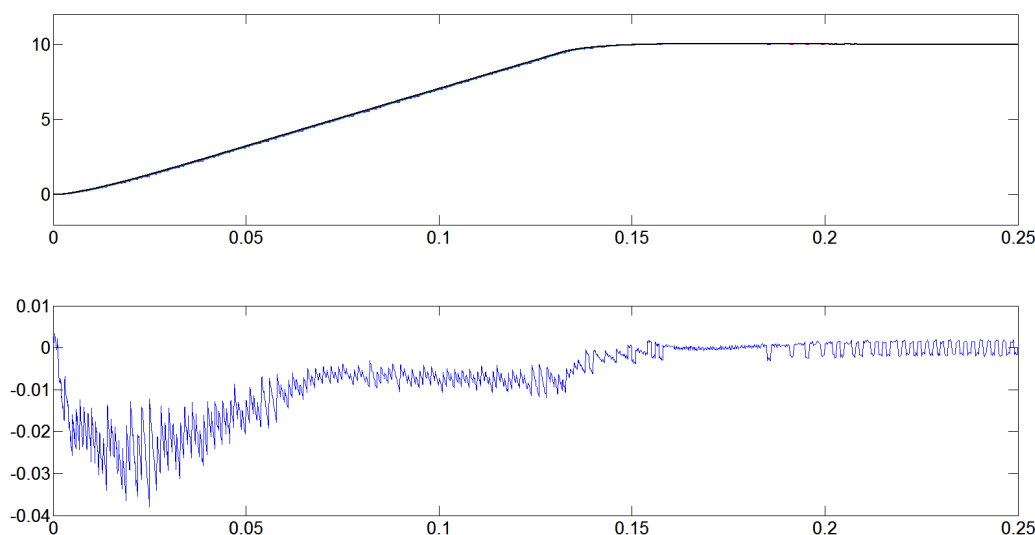


Рисунок 9 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется по предлагаемой авторами методике

Из вышеприведенных рисунков видно существенное повышение точности оценивания угловой скорости платформы поворотного стенда с помощью предлагаемых авторами методов.

Заключение. В работе приведено описание метода оценки угловой скорости платформы поворотного стенда по информации от совокупности датчиков, основанное на методе максимального правдоподобия, использующем полученные авторами распределения плотностей вероятностей погрешностей датчиков угловой скорости, угла, тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения.

Показано, что законы распределения плотностей вероятности погрешностей различных датчиков из состава поворотного стенда не соответствуют нормальному закону распределения. Авторы делают вывод о некорректности использования для определения оптимальной оценки угловой скорости по информации с совокупности всех датчиков стенда, метода наименьших квадратов, так как найденная оценка не будет асимптотически эффективной. Поэтому предлагается использовать метод максимального правдоподобия для определения оптимальной с точки зрения минимума квадрата погрешности оценки угловой скорости поворотной платформы стенда.

Использование совокупной информации с датчиков параметров движения, основанных на различных физических принципах измерения, в сочетании с оптимальными методами обработки полученных экспериментальных данных, позволяет точнее оценивать и задавать параметры движения прецизионных поворотных платформ.

Библиографический список

1. Аникст Д. А. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин. – Москва : Машиностроение, 1987. – 480 с.
2. Блантер Б. Э. Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот 0,5–104 Гц / Б. Э. Блантер, А. Ф. Бордиловский, А. Е. Синельников, В. С. Шкалик // Измерительная техника. – 1975. – № 10. – С. 10–12.
3. Блантер Б. Э. Состояние и перспективы создания средств передачи размера единицы плоского угла, угловой скорости и ускорения на основе кольцевых лазеров / Б. Э. Блантер, Е. П. Кривцов, Д. П. Лукьянов, А. Е. Синельников, Ю. В. Филатов, Ю. Н. Шестопалов // Измерительная техника. – 1984. – № 7. – С. 27–29.
4. Бурнашев М. Н. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии / М. Н. Бурнашев, Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 2. – С. 141–146.
5. Васильев В. И. Физическая модель систематического изменения частоты выходного сигнала водородных стандартов частоты и времени / В. И. Васильев // Измерительная техника. – 2014. – № 2. – С. 31–34.
6. Васильев В. И. Водородные стандарты частоты и времени / В. И. Васильев, В. В. Гаврилов, С. А. Козлов // Радиоэлектронные технологии России. – 2012. – С. 97–109.
7. Вучков И. Н. Прикладной линейный регрессионный анализ / И. Н. Вучков, Л. Н. Бояджиева, Е. Б. Солаков. – Москва : Финансы и статистика, 1987. – 239 с.
8. Гончаров А. С. Эталонный комплекс времени и частоты для хранения национальной шкалы времени РФ / А. С. Гончаров, Ю. Ф. Смирнов, И. Б. Норец // Альманах современной метрологии. – 2017. – № 11. – С. 221–229.
9. Калихман Д. М. Прецизионный стенд с датчиком угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента и двухконтурной цифровой системой управления / Д. М. Калихман, Л. Я. Калихман, Ю. В. Садомцев, Е. А. Депутатова, С. Ф. Нахов, А. И. Сапожников, Е. Л. Межирицкий, В. М. Никифоров // Авиационная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 43–49.
10. Домнин Ю. С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 / Ю. С. Домнин, В. Н. Барышев, А. И. Бойко, Г. А. Елкин, А. В. Новоселов // Измерительная техника. – 2012. – № 10. – С. 26–30.
11. Ермаков Р. В. Исследование законов распределения погрешностей датчиков, входящих в состав стендов для задания угловых скоростей / Р. В. Ермаков, Д. М. Калихман, Д. В. Кондратов, А. А. Львов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2016. – № 3. – С. 9–16.
12. Ермаков Р. В. Использование полигауссовской аппроксимации для описания свойств погрешностей оптического датчика угла / Р. В. Ермаков, Д. М. Калихман, А. А. Львов // Надежность и качество : сб. тр. Междунар. симп. – Пенза : ПГУ, 2016. – Т. 2. – С. 23–25.
13. Ермаков Р. В. Анализ погрешностей углоизмерительного стенда на основе оптического бесконтактного датчика угла / Р. В. Ермаков, А. А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации : сб. тр. IV Междунар. науч. конф. : в 2 т. – Саратов : Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 114–121.
14. Исаев Л. К. Метрологические задачи в области малых и сверхмалых величин параметров движения / Л. К. Исаев, А. Е. Синельников // Измерительная техника. – 1998. – № 4. – С. 3.
15. Калихман Д. М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д. М. Калихман ; под общ. ред. акад. В. Г. Пешехонова. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – 296 с.
16. Кирьянов В. П. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) / В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов, Д. Ю. Кручинин, О. Б. Яковлев // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 12. – С. 40–49.
17. Кривцов Е. П. Современное состояние первичных эталонов в областях измерений геометрических, механических и связанных с ними величин / Е. П. Кривцов, К. В. Чекирда, А. А. Янковский // Измерительная техника. 2017. – № 12. – С. 23–27.
18. Кудрявцев М. Д. Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / М. Д. Кудрявцев. – СПб., 2009. – 172 с.
19. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – Москва : ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
20. Львов П. А. Разработка методов, алгоритмов и программ для СВЧ-преобразователей информации в системах управления техническими объектами : дис. ... канд. техн. наук / П. А. Львов. – Саратов, 2011. – 132 с.
21. Мироновский Л. А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений / Л. А. Мироновский, В. А. Слаев. – Санкт-Петербург : Профессионал, 2010. – 192 с.
22. Синельников А. Е. Новый эталон России в области измерения низкочастотных параметров движения / А. Е. Синельников, В. Н. Кудрявцев, П. А. Павлов // Сб. материалов IX Ст.-Петербургской междунар. конф. по инерциальным навигационным системам. – Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 221–229.

23. Синельников А. Е. Принципы построения нового комплексного эталона в области измерений низкочастотных параметров движения / А. Е. Синельников // Механика и навигация. – 1999. – С. 59–61.
24. Тихонов В. И. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В. И. Тихонов, Н. К. Кульман. – Москва : Советское Радио, 1975. – 704 с.
25. Шестопапов Ю. Н. Метрологическое обеспечение углометрии в машиностроении / Ю. Н. Шестопапов // Измерения, контроль, автоматизация. – 1991. – № 2 (78). – С. 20–26.
26. Ямпурин Н. П. Формирование прецизионных частот и сигналов : учеб. пос. / Н. П. Ямпурин, В. В. Болонзев, Е. В. Сафронов, Е. Б. Жалнин. – Нижний Новгород : НГТУ, 2003. – 187 с.
27. Янковский А. А. Вторичный эталон плоского угла: состояние и направления развития / А. А. Янковский, А. В. Плотников, К. Б. Савкин, И. В. Козак // Измерительная техника. – 2012. – № 7. – С. 30–31.
28. Янковский А. А. Новый эталон единицы плоского угла для области обороны и безопасности государства / А. А. Янковский, Плотников А. В., Савкин К. Б., Козак И. В. // Вестник метролога. – 2012. – № 3. – С. 33–35.
29. Bournashev M. N. Reproduction of plane angle unit in dynamic mode by means of ring laser and holographic optical encoder / M. N. Bournashev, Yu. V. Filatov, D. P. Loukianov, P. A. Pavlov, A. E. Sinelnikov // Proc. of 2-nd EUSPEN Int. Conf. – Turin, Italy, 2001. – P. 322–325.
30. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product / A. Chenakin. – N.Y. : Artech House, 2010. – 305 p.
31. Ermakov R. V. Fundamentals of developing integrated digital control of precision stands with inertial sensors using signals from an angular rate sensor, accelerometer, and an optical angle sensor / R. V. Ermakov, D. M. Kalikhman, L. Ya. Kalikhman, S. F. Nahov, V. A. Turkin, A. A. Lvov, Iu. V. Sadomtsev, E. P. Krivtsov, A. A. Iankovskiy // Proc. of 23 St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia : IEEE, 2016. – P. 361–365.
32. Ermakov R. V. Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information From the Sensors of Different Physical Nature / R. V. Ermakov, A. A. Lvov, D. N. Sokolov, D. M. Kalihman // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia : IEEE, 2017. – P. 585–589.
33. Gill P. E. Practical optimization / P. E. Gill, W. Murrey, M. H. Wright. – Elsevier Academic Press, 1981. – 395 p.
34. Havlicek H. S. Improving real-time communication between host and motion system in a HWIL simulation / H. S. Havlicek, Zana L. // SPIE Defense and Security Symposium. – Acutronic, USA, Pittsburgh, 2004. – DOI: 10.1117/12.542637
35. Just A. Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder / A. Just, M. Krause, R. Probst, H. Bosse, H. Haunerding, Ch. Spaeth, G. Metz, W. Israel // Precision Engineering, 2009. – Vol. 3 (10). – P. 530–533.
36. Kalikhman D. M. Ways of extending the measurement range and increasing the accuracy of rotary test benches with inertial sensory elements for gyroscopic devices / D. M. Kalikhman, L. Ya. Kalikhman, E. A. Deputatova, A. K. Krainov, E. P. Krivtsov, A. A. Yankovskiy, R. V. Ermakov, A. A. Lvov // Proc. of the 25-th Anniversary St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg : IEEE, 2018. – P. 460–465. – DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405929.
37. Kalihman D. M. Multi-Purpose Precision Test Simulator With a Digital Control System For Testing Rate Gyroscopes of Different Types / D. M. Kalihman, L. Ya. Kalihman, Yu. V. Sadomtsev, A. V. Polushkin, E. A. Deputatova, R. V. Ermakov, S. F. Nahov, L. A. Izmailov, A. V. Molchanov, M. V. Chirkin // Proc. of the 17th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg : IEEE, 2010. – P. 151–156.
38. Krause M. Angle metrology at the PTB: current status and developments / M. Krause, A. Just, R. D. Geckeler, H. Bosse // Proc. of the 9-th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments. – St. Petersburg, Russia, 2009. – P. 2/092–6/092/.
39. Šiaudinytė L. Research and development of methods and instrumentation for the calibration of vertical angle measuring systems of geodetic instruments: doctoral dissertation, technological sciences, measurement engineering / L. Šiaudinytė. – Vilnius Gediminas Technical University, 2014. – 134 p.
40. Marrison W. The Evolution of the Quartz Crystal Clock // Bell System Technical Journal. – 1948. – Iss. 27 (3). – P. 510–588. – DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01343.x.
41. Masuda T. High accuracy calibration system for angular encoders / T. Masuda, M. Kajitani // Journal of robotics and mechatronics. – 1993. – Vol. 5 (5). – P. 448–452.
42. Mokros J. Kruhovy laser a mereni uhlu / J. Mokros, K. X. Vu // Jemna Mechanika a Optika. – 1993. – № 9 (203). – P. 203–205 (на чешском).
43. Probst R. A Primary Standard for Angle Measurement / R. Probst, M. Krause // Proc. of the 2-nd Int. EUSPEN Conf. – Turin, Italy, 2001. – P. 327–329.
44. Probst R. The new PTB angle comparator / R. Probst, R. Wittekopf, M. Krause, H. Dangschat, A. Ernst // Measurement Science and Technology. – 1998. – № 9. – P. 1059–1066.
45. Sim P. J. Angle standards and their calibration / P. J. Sim // Modern Techniques in Metrology. – Singapore : World Scientific, 1984. – P. 102–121.
46. Velikoseltsev A. On the Application of Fiber Optic Gyroscopes for Detection of Seismic Rotations / A. Velikoseltsev, A. Boronachin, A. Tkachenko, K. U. Schreiber, A. Yankovsky, J.-P. R. Wells // Journal of Seismology, 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 623–637.

47. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high precision calibration system for angle encoder / T. Watanabe, H. Fujimoto, K. Nakayama, T. Masuda, M. Kajitani // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4401. – Pt. 1. – P. 267–274; 2003. – Vol. 5190. – Pt. 2. – P. 400–409.

References

1. Anikst D. A., Konstantinovich K. M., Meskin I. V. *Vysokotochnye uglovye izmereniya* [High precision angular measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 480 p.
2. Blanter B. E., Bordilovskiy A. F., Sinelnikov A. E., Shkalikov V. S. Gosudarstvennyy spetsialnyy etalon edinit dliny, skorosti i uskoreniya pri kolebatelnom dvizhenii tverdogo tela v diapazone chastot 0,5–104 Gts [State special standard of units of length, speed and acceleration during vibrational motion of a solid in the frequency range 0.5–104 Hz]. *Izmeritel'naya tekhnika*, [Measurement Techniques], 1975, no. 10, pp. 10–12.
3. Blanter B. E., Krivtsov E. P., Lukyanov D. P., Sinelnikov A. E., Filatov Yu. V., Shestopalov Yu. N. Sostoyaniye i perspektivy sozdaniya sredstv peredachi razmera edinitcy ploskogo ugla, uglovoy skorosti i uskoreniya na osnove koltsevykh lazerov [Status and prospects of creating means for transmitting the unit size of a plane angle, angular velocity and acceleration based on ring lasers]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 1984, no. 7, pp. 27–29.
4. Burnashev M. N., Lukyanov D. P., Pavlov P. A., Filatov Yu. V. Razvitiye metodov i sredstv lazernoy dinamicheskoy goniometrii [Development of methods and equipment of laser dynamic goniometry]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2000, vol. 30, no. 2, P. 141–146.
5. Vasilev V. I. Fizicheskaya model sistematicheskogo izmeneniya chastoty vykhodnogo signala vodorodnykh standartov chastoty i vremeni [Physical model of the systematic change in the output signal frequency of the hydrogen standards of frequency and time]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2014, no. 2, pp. 160–165.
6. Vasilev V. I., Gavrilov V. V., Kozlov S. A. Vodorodnye standarty chastoty i vremeni [Hydrogen frequency and time standards]. *Radioelektronnyye tekhnologii Rossii* [Radio-electronic technologies of Russia], 2012, pp. 97–109.
7. Vuchkov I. N., Boiadzhieva L. N., Solakov E. B. *Prikladnoy lineinyy regressionnyy analiz* [Applied Linear Regression Analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1987. 239 p.
8. Goncharov A. S., Smirnov Yu. F., Norets I. B. Etalonnyy kompleks vremeni i chastoty dlya khraneniya natsionalnoy shkaly vremeni RF [Reference time and frequency complex for storing the national time scale of the Russian Federation]. *Almanakh Sovremennoy Metrologii* [Almanac of modern metrology], 2017, no. 11, pp. 221–229.
9. Kalihman D. M., Kalihman L. Ya., Sadomtsev Yu. V., Deputatova, E. A., Nahov S. F., Sapozhnikov A. I., Mezheritskiy E. L., Nikiforov V. M. Pretsizionnyy stend s datchikom uglovy skorosti v kachestve inertsiynogo chuvstvitel'nogo elementa i dvukhkonturnoy tsifrovoy sistemy upravleniya [Precision bench with an angular velocity sensor as an inertial sensing element and a dual-circuit digital control system]. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 2010, no. 1, pp. 43–49.
10. Domnin Yu. S., Kopylov L. N., Coopalov D. S., Elkin G. A., Novoselov A. V. Tsezievyy reper chastoty fontannogo tipa MTCR-F2 [The cesium benchmark of frequency of the fountain type MTsR-F2]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2012, no. 10, pp. 26–30.
11. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Kondratov D. V., Lvov A. A. Issledovanie zakonov raspredeleniya pogreshnostey datchikov, vkhodyashchikh v sostav stendov dlya zadaniya uglovykh skorostey [The study of the laws of the distribution of errors of the sensors included in the composition of the stands for setting angular velocities]. *Matematicheskoe modelirovaniye, kompyuternyy i naturnyy eksperiment v estestvennykh naukakh* [Mathematical Modeling, Computer and Natural Experiment in the Natural Sciences], 2016, no. 3, pp. 9–16.
12. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Lvov A. A. Ispolzovaniye poligaussovskoy approksimatsii dlya opisaniya svoystv pogreshnostey opticheskogo datchika ugla [Using the polyGaussian approximation to characterize the properties of the optical angle sensor errors]. *Nadezhnost i kachestvo : sbornik trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium]. Penza, 2016, vol. 2, pp. 23–25.
13. Ermakov R. V., Lvov A. A. Analiz pogreshnostey ugloizmeritel'nogo stenda na osnove opticheskogo beskontaktnogo datchika ugla [Error analysis of the angle measuring bench based on the optical non-contact angle sensor]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii : sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Problems of Control, Information Processing and Transmission : Proceedings of the IV International Scientific Conference]. Saratov, Russia, 2015, vol. 2, pp. 114–121.
14. Isaev L. K., Sinelnikov A. E. Metrologicheskie zadachi v oblasti malyykh i sverkhmalyykh velichin parametrov dvizheniya [Metrological tasks in the field of small and very small values of motion parameters]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 1998, no. 4, pp. 3–6.
15. Kalikhman D. M. *Pretsizionnye upravlyayemye stendy dlya dinamicheskikh ispytaniy giroskopicheskikh priborov* [Precision guided stands for dynamic testing of gyroscopic instruments]. St. Petersburg, GNTC RF TCNII «Elektroprigor», 2008. 296 p.
16. Kiryanov V. P., Kiryanov A. V., Kruchinin D. Yu., Yakovlev O. B. Analiz sovremennykh tekhnologiy sinteza ugloizmeritel'nykh struktur dlya vysokotochnykh uglovykh izmereniy (Analiticheskiy obzor) [Analysis of modern technologies for the synthesis of angle measuring structures for high-precision angular measurements (Analytical review)]. *Opticheskyy zhurnal* [Optical Journal], 2007, vol. 74, no. 12, P. 40–49.
17. Krivtsov E. P., Chekirda K. V., Iankovskiy A. A. Sovremennoe sostoyaniye pervichnykh etalonov v oblasti izmereniy geometricheskikh, mekhanicheskikh i svyazannykh s nimi velichin [The current state of primary

standards in the fields of measurements of geometric, mechanical and related quantities]. *Izmeritelnaya tekhnika* [Measurement Techniques], 2017, no. 12, pp. 23–27.

18. Kudryavtsev M. D. *Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov izmereniy ploskogo ugla dlya graduировки pretzionnykh navigatsionnykh datchikov* [Methods of planning and processing the results of measurements of a flat angle for graduation of precision navigation sensors]. St. Petersburg, 2009. 172 p.

19. Linnik Yu. V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least Squares Method and the Basics of Observed Data Processing Theory]. Moscow, GIFML Publ., 1958. 334 p.

20. Lvov P. A. *Razrabotka metodov, algoritmov i programm dlya SVCh-preobrazovateley informatsii v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi obektami* [Development of methods, algorithms, and programs for microwave information converters in control systems for technical objects]. Saratov, 2011. 132 p.

21. Mironovskiy L. A., Slaev V. A. *Algoritmy otsenivaniya rezultata trekh izmereniy* [Algorithms for evaluating the result of three measurements]. St. Petersburg, Professional Publ., 2010. 192 p.

22. Sinelnikov A. E., Kudryavtsev V. N., Pavlov P. A. *Novyy etalon Rossii v oblasti izmereniya nizkочастотных параметров движения* [The new standard of Russia in the field of measuring low-frequency motion parameters]. *Sbornik materialov IX St.-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po inertialnym navigatsionnym sistemam* [Proceedings of the IX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2002, P. 221–229.

23. Sinelnikov A. E. *Printsipy postroeniya novogo kompleksnogo etalona v oblasti izmereniy nizkочастотных параметров движения* [The principles of constructing a new integrated standard in the field of low-frequency motion parameter measurements]. *Mekhanika i navigatsiya* [Mechanics and Navigation]. St. Petersburg, 1999, pp. 59–61.

24. Tikhonov V. I., Kuhlman N. K. *Nelineynaya filtratsiya i kvazikogerentnyy priyem signalov* [Nonlinear filtering and quasicohherent signal reception]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1975. 704 p.

25. Shestopalov Yu. N. *Metrologicheskoe obespechenie uglometrii v mashinostroenii* [Metrological support of angularity in mechanical engineering]. *Izmereniya, kontrol, avtomatizatsiya* [Measurement, Test, Automation], 1991, no. 2, vol. 78, pp. 20–26.

26. Yampurin N. P., Boloznev V. V., Safronov E. V., Zhalnin E. B. *Formirovanie pretzionnykh chastot i signalov* [Precision frequencies and signals generation] Tutorial. Nizhnii Novgorod: NGTU, 2003, 187 p.

27. Yankovskiy A. A., Plotnikov A. V., Savkin K. B., Kozak I. V. *Vtorichnyy etalon ploskogo ugla: sostoianie i napravleniya razvitiya* [Secondary standard of a flat angle: state and directions of development]. *Izmeritelnaya tekhnika* [Measurement Techniques], 2012, no. 7, pp. 30–31.

28. Yankovskiy A. A., Plotnikov A. V., Savkin K. B., Kozak I. V. *Novyy etalon edinitsy ploskogo ugla dlya oblasti oborony i bezopasnosti gosudarstva* [The new standard of the unit of a flat angle for the field of defense and security of the state]. *Vestnik metrologa* [Metrologist Bulletin], 2012, no. 3, pp. 33–35.

29. Bournashev M. N., Filatov Yu. V., Loukyanov D. P., Pavlov P. A., Sinelnikov A. E. *Reproduction of plane angle unit in dynamic mode by means of ring laser and holographic optical encoder. Proc. of 2-nd EUSPEN Int. Conf.* Turin, Italy, 2001, pp. 322–325.

30. Chenakin A. *Frequency Synthesizers: From Concept to Product*. N.Y., Artech House, 2010. 305 p.

31. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Kalikhman L. Ya., Nahov S. F., Turkin V. A., Lvov A. A., Sadomtsev Iu. V., Krivtsov E. P., Iankovskiy A. A. *Fundamentals of developing integrated digital control of precision stands with inertial sensors using signals from an angular rate sensor, accelerometer, and an optical angle sensor. Proc. of the 23 St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, Russia, IEEE, 2016, pp. 361–365.

32. Ermakov R. V., Lvov A. A., Sokolov D. N., Kalihman D. M. *Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information From the Sensors of Different Physical Nature. Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia, IEEE, 2017, pp. 585–589.

33. Gill P. E., Murrey W., Wright M. H. *Practical optimization*. Elsevier Academic Press, 1981. 395 p.

34. Havlicek H. S., Zana L. *Improving real-time communication between host and motion system in a HWIL simulation. SPIE Defense and Security Symposium*, Acutronic, USA, Pittsburgh, 2004. DOI: 10.1117/12.542637.

35. Just A., Krause M., Probst R., Bosse H., Haunerding H., Spaeth Ch., Metz G., Israel W. *Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder. Precision Engineering*, 2009, vol. 3 (10), pp. 530–533.

36. Kalikhman D. M., Kalikhman L. Ya., Deputatova E. A., Krainov A. K., Krivtsov E. P., Yankovskiy A. A., Ermakov R. V., Lvov A. A. *Ways of extending the measurement range and increasing the accuracy of rotary test benches with inertial sensory elements for gyroscopic devices. Proc. of the 25-th Anniversary St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2018, pp. 460–465. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405929.

37. Kalihman D. M., Kalihman L. Ya., Sadomtsev Yu. V., Polushkin A. V., Deputatova E. A., Ermakov R. V., Nahov S. F., Izmailov L. A., Molchanov A. V., Chirkin M. V. *Multi-Purpose Precision Test Simulator With a Digital Control System For Testing Rate Gyroscopes of Different Types. Proc. of the 17th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, IEEE, 2010, pp. 151–156.

38. Krause M., Just A., Geckeler R. D., Bosse H. *Angle metrology at the PTB: current status and developments. Proc. of the 9-th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments*. St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 2/092–6/092/.

39. Šiaudinytė L. *Research and development of methods and instrumentation for the calibration of vertical angle measuring systems of geodetic instruments: doctoral dissertation, technological sciences, measurement engineering*. Vilnius Gediminas Technical University, 2014. 134 p.

40. Marrison W. The Evolution of the Quartz Crystal Clock. *Bell System Technical Journal*, 1948, iss. 27 (3), pp. 510–588. DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01343.x.
41. Masuda T., Kajitani M. High accuracy calibration system for angular encoders. *Journal of robotics and mechatronics*, 1993, vol. 5 (5), pp. 448–452.
42. Mokros J., Vu K. X. Kruhovy laser a mereni uhlu. *Jemna Mechanika a Optika*, 1993, no. 9 (203), pp. 203–205 (in Czech).
43. Probst R., Krause M. A Primary Standard for Angle Measurement. *Proc. of the 2-nd Int. EUSPEN Conf.* Turin, Italy, 2001, pp. 327–329.
44. Probst R., Wittekopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The new PTB angle comparator. *Measurement Science and Technology*, 1998, no. 9, pp. 1059–1066.
45. Sim P. J. Angle standards and their calibration. *Modern Techniques in Metrology*. Singapore, World Scientific, 1984, pp. 102–121.
46. Velikoseltsev A., Boronachin A., Tkachenko A., Schreiber K. U., Yankovsky A., Wells J.-P. R. On the Application of Fiber Optic Gyroscopes for Detection of Seismic Rotations. *Journal of Seismology*, 2012, vol. 16, no. 4, pp. 623–637.
47. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high precision calibration system for angle encoder. *Proc. of SPIE*, 2001, vol. 4401, pt. 1, pp. 267–274; 2003, vol. 5190, pt. 2, pp. 400–409.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.164-175

УДК (621.396+004.2):621.317.75:621.372.8

СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО ВОЛЬТМЕТРА В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Статья поступила в редакцию 10.09.2019, в окончательном варианте – 26.11.2019.

Николаенко Артем Юрьевич, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, e-mail: anikolaenosstu@gmail.com

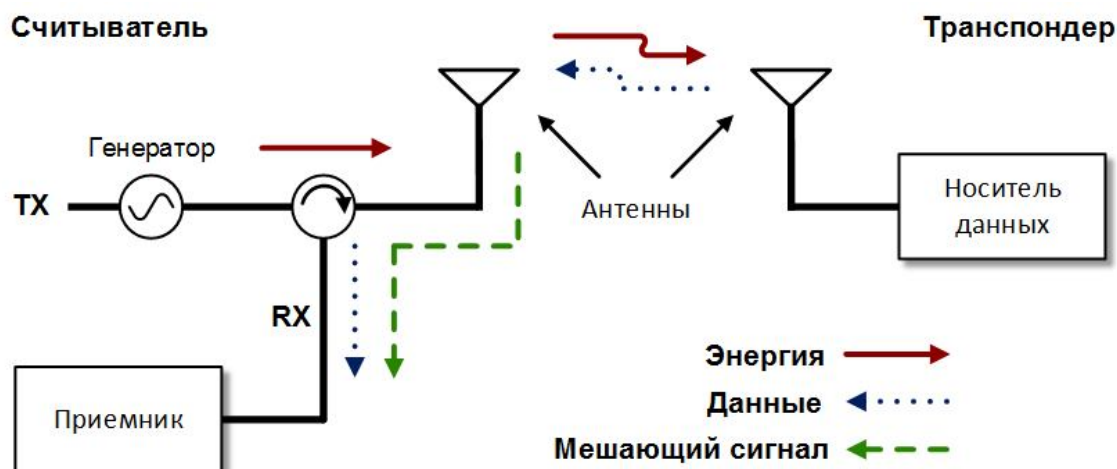
Львов Алексей Арленович, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, e-mail: alvova@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, доктор технических наук, профессор, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Предложен новый подход к построению измерителя параметров приборов на СВЧ, основанный на применении многоканального векторного вольтметра. Предлагаемый измеритель можно с успехом использовать в качестве считывателя системы радиочастотной идентификации для повышения дальности действия считывателя. Обосновано использование выбранной структурной схемы измерителя-считывателя, когда в качестве измерительного блока используется комбинированный многополюсный рефлектометр, к измерительным выходам которого подсоединяются схемы понижения частоты измерения. В работе описаны разработанные алгоритмы проведения измерения и калибровки предлагаемого измерителя, оптимальные в смысле минимума среднего квадрата погрешностей измерения или калибровки соответственно. Важной особенностью предлагаемой процедуры калибровки является отсутствие прецизионных калибровочных эталонов отражения или передачи, что существенно упрощает и удешевляет измеритель. Приведены результаты имитационного моделирования процессов измерения и калибровки описанного измерителя, подтвердившие высокую эффективность его применения в качестве считывателя в системах радиочастотной идентификации.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, измеритель на СВЧ, считыватель, векторный вольтметр, многополюсный рефлектометр, многозондовая измерительная линия, блок понижения частоты, метод наименьших квадратов

Графическая аннотация (Graphical annotation)



A MICROWAVE ANALYZER BASED ON THE MULTI-CHANNEL VECTOR VOLTMETER FOR RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 10.09.2019, in the final version – 26.11.2019.

Nikolaenko Artem Yu., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytekhnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,
post-graduate student, e-mail: anikolaenosstu@gmail.com

Lvov Alexey A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytekhnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: alvova@mail.ru

Yurkov Nikolay K., Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation,
Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

A new approach to design and development of a microwave device parameter meter based on a multi-channel vector voltmeter is suggested in the paper. The proposed meter can be successfully used as a reader of the radio frequency identification system in order to increase its operation range. The use of the offered meter functional block-diagram when a combined multi-port reflectometer with subsequent down conversion of the measuring frequency is used as the measurement unit. The paper describes the developed algorithms for measuring and calibrating the proposed meter, which are optimal in the sense of the minimum mean square error of measurement or calibration, respectively. An important feature of the proposed calibration procedure is the lack of precision calibration standards for reflection or transmission that simplifies and cheapens the meter drastically. The simulation results of measurement and calibration processes for the described meter are presented, which confirmed the high efficiency of its use as a reader in radio frequency identification systems.

Key words: radio frequency identification, microwave meter, reader, vector voltmeter, multi-port reflectometer, multi-probe transmission line reflectometer, frequency down conversion, least squares estimation

Введение. Радиочастотная идентификация (англ. Radio Frequency Identification, RFID или РЧИД) – технология автоматической идентификации объектов посредством радиосигналов. Основными компонентами РЧИД-системы являются транспондер (радиометка) и считывающее устройство (считыватель) [1, 6, 10, 11, 19, 20]. Радиометка закрепляется на объекте, который необходимо идентифицировать, и содержит в своей памяти уникальный номер. Основной функцией считывателя является извлечение информации радиометки.

Применение РЧИД-систем позволяет существенно повысить эффективность производственных процессов предприятия, снизить влияние человеческого фактора, увеличить скорость выполнения рутинных операций и достоверность результатов идентификации [1, 11, 19, 20].

К современным РЧИД-системам предъявляются жесткие требования по габаритам, низкой стоимости и большей дальности считывания радиометки. Предъявляемым требованиям наиболее полно соответствуют пассивные РЧИД-системы. Так, в радиометках пассивных РЧИД-систем отсутствует внутренний источник питания, что делает пассивную радиометку дешевой, компактной, надежной и долговечной. Кроме того, увеличение частоты работы пассивных РЧИД-систем при-

водит к еще большему снижению стоимости радиометки, уменьшению габаритов ее антенны, повышению скорости передачи информации и увеличению дальности считывания системы. Поэтому применение пассивных РЧИД-систем диапазона СВЧ представляется очень перспективным. В настоящее время наибольшее распространение, ввиду указанных преимуществ, получили радиометки, работающие на частотах 868 и 915 МГц.

Тем не менее пассивные РЧИД-системы имеют определенные ограничения. Так, пассивная радиометка передает информацию считывателю при помощи вариации нагрузки и модуляции обратного рассеяния, поскольку не имеет внутреннего источника питания. Дальность считывания такой радиометки не превышает десяти метров. Кроме того, так как передатчик и приемник считывателя во время идентификации радиометки работают одновременно, происходит проникание отраженного от антенны считывателя зондирующего сигнала в его приемную часть, что приводит к блокированию сигнала радиометки. Это является одной из основных проблем, которые ограничивают дальность считывания информации у пассивных РЧИД-систем.

Существующие решения данной проблемы [6, 12, 13] нельзя назвать вполне удачными, поскольку они или обеспечивают низкие параметры изоляции, или основаны на точном знании комплексного коэффициента отражения (ККО) антенны считывателя, который сильно зависит от параметров окружающей среды и может меняться, например, из-за изменения температуры, под влиянием факторов наличия металлических объектов или жидкостей вблизи антенны. Это существенно снижает дальность считывания радиометки и может являться источником ошибок идентификации. Поэтому необходимо предложить такое решение данной проблемы, которое обеспечит высокоточное измерение модуля и фазы слабого сигнала радиометки в условиях действия мощного мешающего сигнала и не зависит от факторов окружающей среды. Решение этой задачи и является целью настоящей статьи.

Считыватель РЧИД-системы на основе ААЦ. Предлагается новый подход к построению считывателя РЧИД-системы диапазона СВЧ, основанный на использовании автоматических анализаторов цепей (ААЦ) – приборов, которые традиционно применяются для измерения ККО электронных устройств и поверхностей [2, 8, 9].

В настоящее время для создания ААЦ применяются два широко известных метода: векторного вольтметра (ВВ) и многополюсного рефлектометра (МР) [2, 8]. Недостатками анализатора, основанного на ВВ, является сложность изготовления и его высокая стоимость. Данные ААЦ способны измерять ККО нагрузок при ослаблениях зондирующего сигнала, достигающих 80–100 дБ, но их стоимость на рынке достигает 100 тыс. долларов США, что делает их недоступными для РЧИД-систем. Главным недостатком метода МР является трудность калибровки измерителя, для проведения которой необходимы точно известные калибровочные эталоны отражения.

На основе проведенного в работе [17] анализа автоматических методов измерения на СВЧ можно сделать следующий вывод: ввиду указанных недостатков (прежде всего своей дороговизны) существующие ААЦ не могут быть успешно применены в считывателе РЧИД-системы. Действительно, для того чтобы технология РЧИД стала массовой и вовлеченной во многие сферы жизни и бизнеса, компоненты РЧИД-системы, в том числе и считыватель, должны быть доступными для потребителя.

Поэтому для применения в считывателе РЧИД-системы предлагается новый векторный измеритель параметров СВЧ-устройств [15], структурная схема которого представлена на рисунке 1.

В предлагаемом ААЦ выходы измерительных плеч комбинированного МР (КМР), состоящего из собственно МР и многозондовой измерительной линии (МИЛ) [16, 17], подключены к смесителям БПЧ. После понижения частоты аналоговые сигналы, пропорциональные откликам измерительных плеч МР, преобразуются в цифровую форму и вводятся в память компьютера с помощью платы сбора данных (ПСД). Вся последующая обработка измерительной информации производится в цифровой форме с использованием соответствующего математического обеспечения.

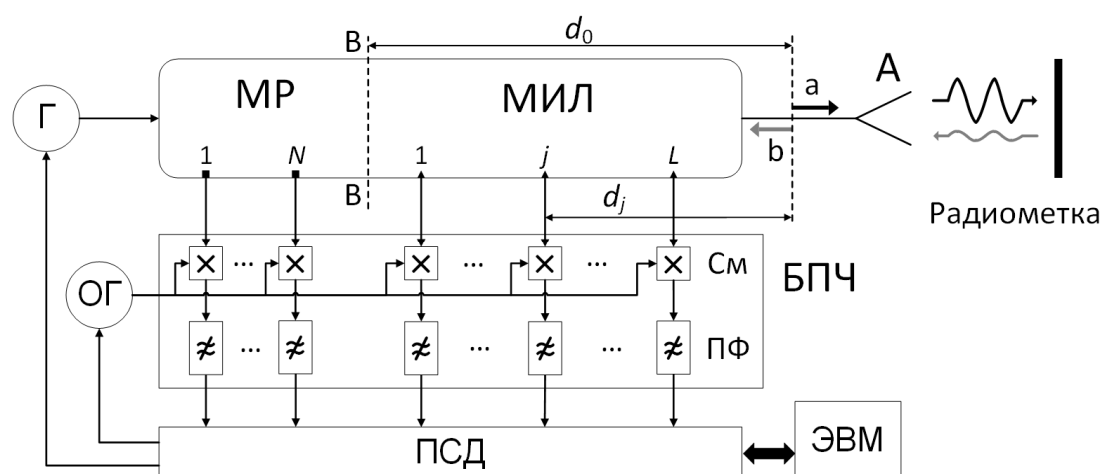


Рисунок 1 – Схема считывателя РЧИД-системы на основе многоканального ВВ: Γ , $ОГ$ – основной и опорный СВЧ-генераторы; $МР$ – многополюсный рефлектометр; 1, 2, ..., N – измерительные плечи; $МИЛ$ – многозондовая измерительная линия; 1, 2, ..., L – зонды МИЛ; A – антенна; $См$ – смесители; $ПФ$ – полосовые фильтры; $БПЧ$ – блок понижения частоты; $ПСД$ – плата сбора данных

Применение БПЧ позволяет получить линейную систему уравнений измерителя, которая связывает комплексную амплитуду отклика j -го измерительного плеча u_j с комплексными амплитудами зондирующего сигнала считывателя a и сигнала радиометки b :

$$u_j = A_j a + B_j b + \Xi_j, \quad (j = \overline{1, N}), \quad (1)$$

где A_j , B_j – комплексные коэффициенты передачи j -го канала (всего N измерительных каналов МР) для зондирующего сигнала считывателя и сигнала радиометки, соответственно, которые необходимо определить при калибровке; Ξ_j – комплексная ошибка измерения u_j .

Модель (1), за исключением ошибок измерения Ξ_j , является классической [2, 8]. Она учитывает все переотражения сигнала в СВЧ-тракте и с успехом используется во всех серийно выпускаемых ААЦ. В предлагаемом измерителе полосовые фильтры нужны только для устранения сигнала суммарной частоты основного и опорного генераторов. Неточность знания коэффициентов усиления смесителей и полосовых фильтров приводит только к изменению коэффициентов передачи A_j и B_j модели (1), которые будут учтены при калибровке измерителя. Кроме того, все переотражения сигнала, возникающие вследствие неоднородностей в СВЧ-тракте (таких как зонды, переходники, антенна), и переотражения от окружающих считыватель предметов, также учитываются в комплексных коэффициентах передачи каналов измерителя A_j и B_j [2, 8]. Сама процедура калибровки заключается именно в нахождении данных коэффициентов.

В предлагаемом измерителе (рис. 1) часть МР предназначена только для измерения сигналов a и b , а часть МИЛ – только для проведения калибровки части МР, которая состоит в определении комплексных коэффициентов передачи измерительных плеч МР A_j и B_j . Главное достоинство ААЦ на основе МР состоит в том, что эти коэффициенты учитывают все возможные переотражения сигналов a и b внутри МР [2, 17], а также различия в коэффициентах передачи и усиления смесителей и полосовых фильтров БПЧ. Алгоритм измерения параметров сигнала радиометки с помощью предлагаемого измерителя и алгоритм его калибровки представлены ниже.

Алгоритм измерения параметров сигнала радиометки. Алгоритм измерения заключается в нахождении оценки неизвестной комплексной амплитуды сигнала радиометки b по цифровым отсчетам измеренных напряжений на выходе ПСД. При этом на этапе измерения комплексные коэффициенты передачи A_j и B_j считаются известными, предполагается, что они найдены в процессе калибровки. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма вычисления оценок комплексных амплитуд a и b

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, на первый вход смесителя БПЧ подается сигнал с измерительного выхода МР, а на второй – напряжение опорного генератора, следовательно, зависимость от времени сигнала $v_j(t)$ на выходе j -го смесителя имеет вид [4, 15]:

$$v_j = U_{mj} \{ \cos(\Delta\omega t + \varphi_j) + \cos[(2\omega - \Delta\omega)t + \varphi_j] \} + c_j,$$

где U_{mj} , φ_j – соответственно, неизвестные амплитуда и фаза СВЧ сигнала на выходе j -го смесителя; c_j – неизвестное постоянное смещение сигнала, обусловленное прямым понижением его частоты; ω – известная круговая частота зондирующего сигнала; $\Delta\omega$ – известная разность между круговыми частотами основного Г и опорного ОГ генераторов. Полосовой фильтр выделяет только низкочастотную составляющую сигнала $v_j(t)$:

$$g_j(t) = U_j \cos(\Delta\omega t + \varphi_j) + c_j + \xi_j,$$

где $U_j = \beta U_{cj}$ – неизвестная амплитуда сигнала на выходе j -го ПФ; ξ_j – действительная погрешность измерения напряжения в j -м канале.

После понижения частоты действительные сигналы измерительных каналов преобразуются в цифровую форму в ПСД, образуя N последовательностей по K отсчетов в каждой:

$$g_j(t_k) = g_{jk} = U_j \cos(\Delta\omega k\tau + \varphi_j) + c_j + \xi_{jk}, \quad (k = \overline{1, K}), \quad (2)$$

где τ – период дискретизации сигнала; k – номер отсчета измеренного оцифрованного сигнала; ξ_{jk} – действительная ошибка k -го измерения в j -м канале.

Первый этап обработки данных g_{jk} , полученных с измерительных каналов МР, заключается в оценивании на их основе комплексных амплитуд u_j .

После преобразования системы (2) и замены переменных:

$$\begin{cases} y_j = U_j \cos(\varphi_j) \\ z_j = U_j \sin(\varphi_j) \end{cases} \quad \begin{cases} x_{1k} = \cos(\Delta\omega k\tau) \\ x_{2k} = -\sin(\Delta\omega k\tau) \\ x_{3k} = 1, \end{cases} \quad (3)$$

она приобретает следующий линейный вид:

$$v_{jk} = y_j x_{1k} + z_j x_{2k} + c_j x_{3k} + \xi_{jk}, \quad (4)$$

Разность частот $\Delta\omega$ остается постоянной в течение всего периода измерения $K\tau$. Поэтому параметры $\Delta\omega$, x_{1k} и x_{2k} считаются известными. Ошибки ξ_{jk} обусловлены действием теплового шума

согласующих усилителей ПСД, поэтому они адекватно описываются независимой выборкой нормального процесса с нулевым математическим ожиданием и неизвестной фиксированной дисперсией σ^2 . Параметры y_j , z_j и c_j модели (4) подлежат оценке, но интерес представляют только первые два из них.

Для оценки на основе проведенных наблюдений широко применяется метод максимального правдоподобия (ММП). Известно [3], что оценки неизвестных параметров, полученные по ММП, обладают свойствами асимптотической несмещенности, состоятельности и асимптотической эффективности. Более того, в случае распределения ошибок модели по нормальному закону оценки ММП совпадают с оценками метода наименьших квадратов (МНК). Это значит, что алгоритм, основанный на ММП, будет оптимальным в смысле минимума среднего квадрата ошибки оценивания.

Решение системы (4) относительно y_j , z_j и c_j по ММП имеет вид [3, 4]:

$$\mathbf{R}_j = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{V}_j), \quad (5)$$

где $\mathbf{R}_j = (\hat{y}_j, \hat{z}_j, \hat{c}_j)^T$ – вектор соответствующих оценок; $\mathbf{V}_j = (v_{j1}, \dots, v_{jK})^T$ – вектор, состоящий из K отсчетов напряжения в j -м канале; $\mathbf{X}$ – матрица, состоящая из величин x_{qk} (3).

Из выражений (3) следует, что y_j и z_j – действительные и мнимые части комплексных амплитуд u_j :

$$\hat{u}_j = U_j \exp\{i\varphi_j\} = \hat{y}_j + i \cdot \hat{z}_j. \quad (6)$$

Вторая часть алгоритма заключается в оценивании неизвестных комплексных амплитуд сигналов a и b по ММП аналогично первому этапу. Для этого найденные оценки $\hat{u}_j$ нужно подставить в (1). Для простоты система из N комплексных уравнений преобразована в эквивалентную систему из $2N$ действительных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{y}_j &= \operatorname{Re}(A_j) \operatorname{Re}(a) - \operatorname{Im}(A_j) \operatorname{Im}(a) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Re}(b) - \operatorname{Im}(B_j) \operatorname{Im}(b) + \operatorname{Re}(\Xi_j), \\ \hat{z}_j &= \operatorname{Im}(A_j) \operatorname{Re}(a) + \operatorname{Re}(A_j) \operatorname{Im}(a) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Re}(b) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Im}(b) + \operatorname{Im}(\Xi_j), \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку составляющие y_j и z_j зависимы, система (7) решается в соответствии со взвешенным МНК [3]:

$$\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z}), \quad (8)$$

где $\mathbf{T} = [\operatorname{Re}(a), \operatorname{Im}(a), \operatorname{Re}(b), \operatorname{Im}(b)]^T$ – вектор неизвестных параметров, подлежащих оценке; $\mathbf{Z} = (\hat{y}_1, \hat{z}_1, \dots, \hat{y}_N, \hat{z}_N)^T$ – вектор действительных и мнимых частей оценок комплексных амплитуд u_j ; $\mathbf{H}$ и $\mathbf{W}$ – матрица коэффициентов передачи измерительных каналов многополосника и диагональная весовая матрица ковариаций вектора $\mathbf{Z}$, соответственно:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(A_1) & -\operatorname{Im}(A_1) & \operatorname{Re}(B_1) & -\operatorname{Im}(B_1) \\ \operatorname{Im}(A_1) & \operatorname{Re}(A_1) & \operatorname{Im}(B_1) & \operatorname{Re}(B_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \operatorname{Re}(A_N) & -\operatorname{Im}(A_N) & \operatorname{Re}(B_N) & -\operatorname{Im}(B_N) \\ \operatorname{Im}(A_N) & \operatorname{Re}(A_N) & \operatorname{Im}(B_N) & \operatorname{Re}(B_N) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \operatorname{diag}(\mathbf{C}, \mathbf{C}, \dots, \mathbf{C}),$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1},$$

где $\mathbf{C}$ – ковариационная матрица (3×3) векторов $\hat{\mathbf{u}}_j$.

Таким образом, при оценивании параметров сигнала радиометки b на первом этапе по ММП вычисляются оценки комплексных амплитуд u_i , а на втором – на основе этих оценок вычисляются оценки неизвестных действительной и мнимой частей сигнала радиометки.

Разработанный алгоритм измерения комплексной амплитуды сигнала радиометки с помощью ААЦ на основе КМР с прямым понижением частоты измерения позволяет создавать высокоточные РЧИД-считыватели. Высокая точность измерений достигается за счет линейности всех операций алгоритма. Кроме того, увеличенное число измерительных каналов позволяет уменьшить случайные ошибки измерения.

Алгоритм калибровки считывателя на основе многоканального векторного вольтметра. Работа ААЦ на базе МР основана на предварительном определении значений констант A_j и B_j , входящих в модель (1), с помощью калибровочных процедур. Существующие алгоритмы калибровки ВВ основаны на подключении к измерителю эталонных нагрузок с точно известными ККО [8] и решении системы (1) относительно коэффициентов A_j и B_j .

Но если ККО нагрузок будут известны неточно, такая процедура калибровки будет приводить к систематическим погрешностям измерений. Поэтому ниже описывается новый алгоритм калибровки предлагаемого измерителя, который позволяет избавиться от систематических погрешностей параметров отражения калибровочных нагрузок, поскольку не предполагает точного знания их ККО.

Сам термин «набор калибровочных нагрузок» здесь используется в том смысле, что для

решения системы калибровочных уравнений КМР требуется несколько нагрузок с неизвестными параметрами отражения для формирования избыточной системы уравнений, из которой будут вычислены искомые калибровочные константы МР.

На этапе калибровки единственно точно известным параметром считается длина волны зондирующего сигнала. В этом случае «набор калибровочных нагрузок» при использовании предлагаемого измерителя в считывателе РЧИД-системы имитирует сама пассивная радиометка, поскольку для передачи информации считывателю модулирует нагрузку своей антенны.

Описываемый алгоритм калибровки КМР с понижением частоты измерения основан на результатах работы [7] и тоже состоит из двух этапов. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3. Первый этап заключается в оценивании коэффициентов передачи МИЛ и параллельном оценивании ККО используемых «калибровочных нагрузок», а на втором этапе найденные оценки ККО нагрузок подставляются в систему (1), которая решается относительно коэффициентов передачи измерительных плеч МР A_j и B_j по измеренным значениям напряжений на выходах БПЧ.

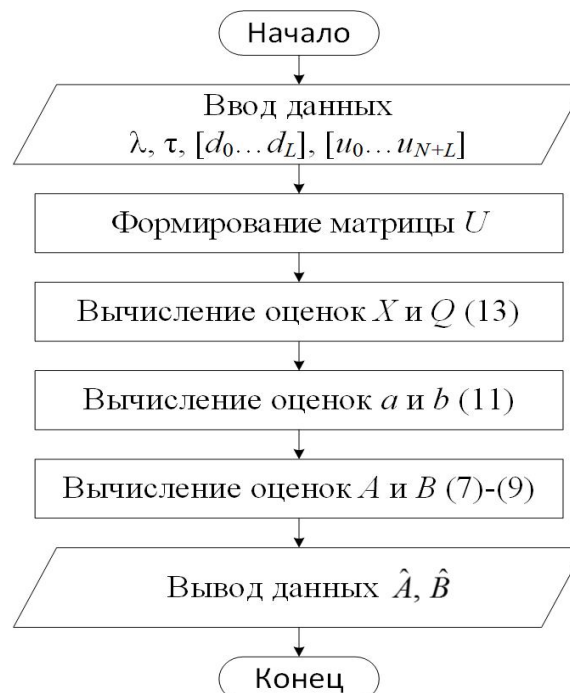


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма вычисления оценок комплексных коэффициентов передачи A и B

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, математическая модель МИЛ с последующим понижением частоты измерения описывается следующей системой уравнений [17]:

$$\begin{aligned}
 y_{jm} &= \alpha_j \cos \psi_j a_m \cos \phi_m + \alpha_j \sin \psi_j a_m \sin \phi_m + \\
 &+ \alpha_j \cos \psi_j a_m \rho_m \cos(\phi_m - \varphi_m) - \alpha_j \sin \psi_j a_m \rho_m \sin(\phi_m - \varphi_m) + \operatorname{Re}(\Xi_{jm}), \\
 z_{jm} &= -\alpha_j \sin \psi_j a_m \cos \phi_m + \alpha_j \cos \psi_j a_m \sin \phi_m + \\
 &+ \alpha_j \sin \psi_j a_m \rho_m \cos(\phi_m - \varphi_m) + \alpha_j \cos \psi_j a_m \rho_m \sin(\phi_m - \varphi_m) + \operatorname{Im}(\Xi_{jm}),
 \end{aligned} \tag{9}$$

где y_{jm} и z_{jm} – действительные и мнимые части соответствующих комплексных амплитуд u_{jm} на выходе j -го канала ($j = \overline{1, L}$) при m -й нагрузке ($m = \overline{1, M}$); L – число каналов МИЛ; α_j – коэффициент передачи j -го зонда; a_m, ϕ_m – соответственно, модуль и аргумент комплексной амплитуды зондирующего сигнала при m -й нагрузке; ρ_m, φ_m – соответственно, модуль и фаза ККО m -й нагрузки; $\psi_j = 2\pi d_j / \lambda$, d_j – расстояние от условной опорной плоскости до j -го зонда, λ – длина волны в тракте МИЛ; $\operatorname{Re}(\Xi_{jm})$, $\operatorname{Im}(\Xi_{jm})$ – действительная и мнимая части погрешности измерения напряжения на выходе j -го канала при m -й нагрузке; M – число калибровочных нагрузок. В (9) только расстояния d_j и длина волны λ считаются точно известными, остальные параметры подлежат оценке путем решения этой системы.

Основная идея предлагаемого алгоритма калибровки рассматриваемого векторного измерителя заключается в первоначальной оценке амплитуд a_m и b_m , используя только сигналы с измерительных

плеч со слабой связью, для которых справедлива модель МИЛ (9). После замены переменных:

$$\begin{cases} s_{j1} = \alpha_j \cos \psi_j, \\ s_{j2} = \alpha_j \sin \psi_j, \\ s_{j3} = \alpha_j \cos \psi_j, \\ s_{j4} = -\alpha_j \sin \psi_j, \end{cases} \quad \begin{cases} t_{j1} = -\alpha_j \sin \psi_j, \\ t_{j2} = \alpha_j \cos \psi_j, \\ t_{j3} = \alpha_j \sin \psi_j, \\ t_{j4} = \alpha_j \cos \psi_j, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} q_{1m} = a_m \cos \phi_m, \\ q_{2m} = a_m \sin \phi_m, \\ q_{3m} = a_m \rho_m \cos(\phi_m - \varphi_m), \\ q_{4m} = a_m \rho_m \sin(\phi_m - \varphi_m), \end{cases} \quad (11)$$

можно [17] записать следующую матричную форму системы (9):

$$\mathbf{U} = \mathbf{X}\mathbf{Q} + \mathbf{\Xi}, \quad (12)$$

где $\mathbf{U}$ – матрица $(2L \times M)$, составленная из величин y_{jm} и z_{jm} ; $\mathbf{\Xi}$ – матрица $(2L \times M)$, составленная из величин $\text{Re}(\xi_{jm})$, $\text{Im}(\xi_{jm})$; $\mathbf{X}$ – матрица $(2L \times 4)$, содержащая коэффициенты модели; $\mathbf{Q}$ – матрица $(4 \times M)$, содержащая параметры зондирующего сигнала и сигнала радиометки.

В работе [16] показано, что решение избыточной системы нелинейных уравнений (12) можно получить по ММП в следующем виде:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{S}^{-1}, \quad \mathbf{Q} = \mathbf{S}\mathbf{M}\mathbf{V}^T, \quad (13)$$

где $\mathbf{W}$ – матрица $(2L \times 4)$, составленная из собственных векторов матрицы $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$, соответствующих четырем ее собственным значениям; $\mathbf{V}$ – матрица $(M \times 4)$, составленная из собственных векторов матрицы $\mathbf{U}^T\mathbf{U}$, соответствующих четырем ее собственным значениям; $\mathbf{S}$ – матрица размера (4×4) , содержащая неизвестные коэффициенты разложения; $\mathbf{M} = \text{diag}\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\}$ – диагональная матрица, состоящая из сингулярных чисел матрицы $\mathbf{U}$.

Коэффициенты передачи α_j , $|A_n|$ и $|B_n|$ – относительные величины, поэтому коэффициент передачи одного из зондов может быть положен равным единице, а остальные $(N+L-1)$ будут рассчитываться относительно него.

На основе проведенных рассуждений и из системы (13) можно определить элементы матрицы $\mathbf{W}$. Оценки элементов матриц $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Q}$ также могут быть вычислены из (13). Оценки неизвестных величин $s_{j\mu}$, $t_{j\mu}$ и $q_{\mu m}$, полученные в результате решения уравнений (12) по ММП, являются оценками максимального правдоподобия и обладают всеми их оптимальными свойствами. Подставив эти значения оценок в (11), можно рассчитать оценки ККО используемых при калибровке нагрузок и параметров зондирующего сигнала и сигнала радиометки в случае, если количество датчиков МИЛ не менее трех ($L = 3$).

Для вычисления оценок коэффициентов передачи измерительных каналов МР A_j и B_j найденные оценки параметров зондирующего сигнала и сигнала радиометки подставляются в (7)–(9). Однако в этом случае известными величинами будут считаться комплексные амплитуды волн a_m и b_m , а неизвестными коэффициенты передачи A_j и B_j , относительно которых должна быть решена система (7).

Несмотря на то, что оценки параметров сигнала радиометки находятся с помощью МИЛ, измерять параметры данного сигнала лучше с помощью МР, а МИЛ использовать только для его калибровки, поскольку отношение сигнал/шум на выходах измерительных зондов МИЛ меньше, чем у датчиков МР, что приводит к увеличению времени накопления информации для достижения необходимой точности.

Предлагаемый алгоритм калибровки измерителя позволяет существенно снизить влияние систематических погрешностей, обусловленных неточностью знания параметров отражения используемых «калибровочных нагрузок», в качестве которых взята антенна радиометки, модулирующая отраженный от нее сигнал. Калибровка считывателя может выполняться во время проведения измерений. Комплексные коэффициенты передачи A_j и B_j , найденные при калибровке, учитывают все погрешности, которые вносят смесители и полосовые фильтры БПЧ. Более того, коэффициенты передачи также учитывают переотражения зондирующего и отраженного от радиометки сигналов внутри КМР, в том числе отражение зондирующего сигнала от антенны считывателя.

Существует еще один резерв повышения точности измерения, основанный на надлежащем выборе положения измерительных датчиков КМР внутри его тракта. Это позволяет конструировать достаточно простые в изготовлении считыватели. Если воспользоваться результатами работы [14], то СВЧ-тракт многополюсника можно выполнить в виде отрезка микроволнового тракта

регулярного поперечного сечения, а измерительные датчики расположить вдоль его центральной продольной оси на расстояниях $\Delta d = r\pi/(N\omega_0)$ (ω_0 – частота зондирующего сигнала считывателя, r – целое число, не кратное $N/2$, N – число измерительных каналов МР). Тогда датчики многополюсника будут расположены в соответствии с D-оптимальным планом эксперимента [14], что делает матрицу $\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}$ из выражения (8) близкой к диагональному виду. В этом случае эллипсоид ошибок оценок комплексных амплитуд сигналов a и b , определяемый данной матрицей, будет иметь минимальный объем [16], поэтому вычисления будут проводиться с максимальной точностью.

Тем не менее ошибки расположения зондов приводят к погрешностям измерения фазы сигнала в СВЧ-тракте. Этот вопрос подробно рассматривался в работах [5, 18], где исследовались погрешности оценивания неизвестных параметров в (9) от неопределенностей знания длины волны в тракте и расположения зондов в линии. Из результатов этих работ следует, что данный источник погрешностей практически не влияет на точность калибровки, если СВЧ-тракт МР и МИЛ реализован по микрополосковой технологии, когда методом фотолитографии зонды устанавливаются с точностью порядка единиц микрон.

Результаты моделирования считывателя на основе многоканального векторного вольтметра. Для исследования точности измерения, характеризуемой средней квадратичной ошибкой в зависимости от отношения сигнал/шум на выходах измерительных плеч ААЦ, было проведено имитационное моделирование процессов калибровки и измерения с помощью описанного векторного измерителя с четырьмя датчиками МР и тремя зондами МИЛ. При моделировании учитывались возможные погрешности расположения зондов в МИЛ, характерные для микрополосков. Параметры комплексных коэффициентов передачи измерительных плеч A_j и B_j определялись в процессе калибровки измерителя. Моделирование проводилось для различных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) нагрузки антенны исследуемой радиометки. На рисунке 3 приведены зависимости дисперсии погрешности оценивания модуля и фазы ККО нагрузки антенны радиометки от отношения сигнал/шум на выходе датчиков для различных значений КСВн измеряемых нагрузок.

Из линейного вида графиков, представленных на рисунке 4 в логарифмическом масштабе, следует, что увеличение отношения сигнал/шум приводит к соответствующему пропорциональному повышению точности (снижению погрешностей оценивания), то есть отсутствуют погрешности, связанные с неточным знанием ККО калибровочных нагрузок. Поэтому у ВВ с комбинированной схемой МР и МИЛ эти систематические погрешности перестают быть основными, поскольку алгоритм калибровки не предполагает их точного знания.

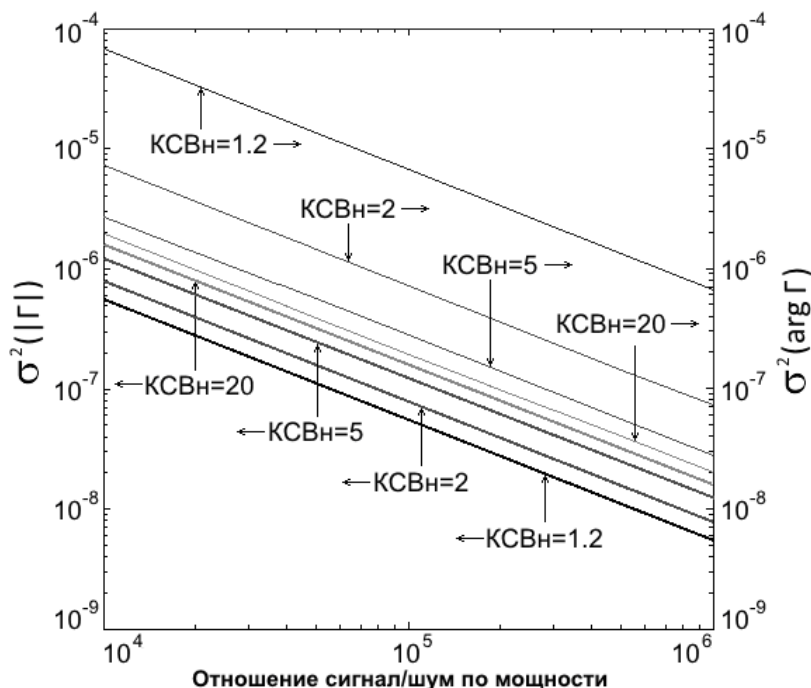


Рисунок 3 – Зависимость дисперсии погрешности оценивания модуля (толстые кривые) и фазы (тонкие кривые) ККО от отношения сигнал/шум по мощности

Также было проведено моделирование процессов измерения и калибровки считывателя РЧИД-системы в случае модуляции отраженного от антенны радиометки сигнала методом квадратурных амплитуд (QAM 64). На рисунке 5 представлены сигнальные созвездия QAM 64, полученные для различных отношений сигнал/шум по мощности на выходах измерительных плеч КМР (20 дБ, 30 дБ).

Из-за наличия шума в моделях (2), (9) звездная диаграмма рассеяния имеет вид пятен, расположенных в точках используемого сигнального созвездия. Уменьшение отношения сигнал/шум приводит к более расплывчатому образу точки, а в дальнейшем к перекрытию образов. Но даже в случае отношения сигнал/шум 20 дБ происходит надежное детектирование искаженного образа сигнала.

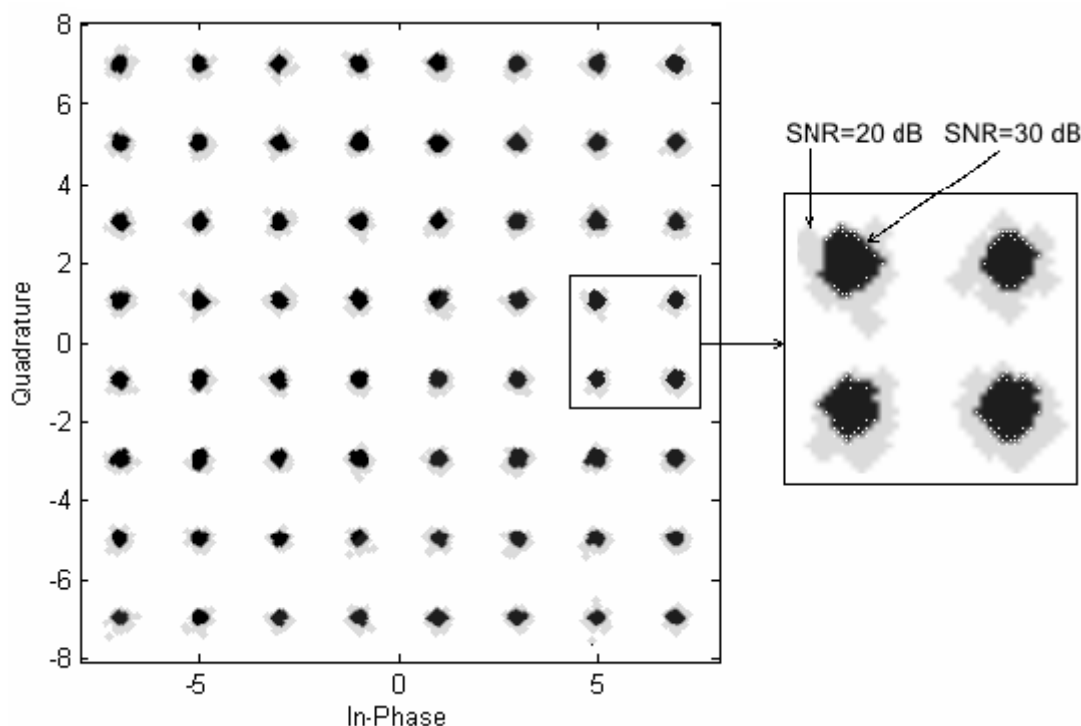


Рисунок 4 – Сигнальные созвездия QAM 64 при различных отношениях сигнал/шум (SNR) по мощности [дБ]

Закключение. Предлагаемый подход к построению считывателя РЧИД-системы, в совокупности с разработанными оптимальными алгоритмами обработки информации, позволяет с высокой точностью оценивать модуль и фазу сигнала пассивной радиометки, работающей в диапазоне СВЧ (например, на частоте 868 МГц). Данный подход не предполагает компенсации мешающего сигнала, поскольку учитывает его на этапе калибровки измерителя, которая может проводиться во время проведения измерений параметров сигнала радиометки, и не зависит от факторов окружающей среды: изменения температуры, наличия вблизи антенны считывателя жидкостей или металлических объектов.

Таким образом, можно достичь увеличения дальности считывания РЧИД-систем без применения методов компенсации мешающего сигнала, что, в совокупности с дешевизной производства и простотой конструкции предлагаемого измерителя, делает возможным применение данного считывателя в современных пассивных РЧИД-системах диапазона СВЧ.

Библиографический список

1. Григорьева А. Тенденции развития RFID технологии: обзор мирового и российского рынка / А. Григорьева // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2016. – № 4. – С. 44–49.
2. Гупта К. Машинное проектирование СВЧ устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – Москва : Радио и связь, 1987. – 432 с.
3. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – Москва : ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
4. Львов А. А. Оптимальное оценивание параметров СВЧ-цепей с помощью автоматических анализаторов цепей. Алгоритмы обработки наблюдаемых данных / А. А. Львов, В. П. Мещанов, М. С. Светлов, А. Ю. Николаенко // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 147–154.

5. Львов А. А. Статистический анализ точностных характеристик метода многозондовой измерительной линии / А. А. Львов, А. А. Моржаков, А. В. Жуков // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1990. – Вып. 1 (425). – С. 50–57.
6. Мучкаев А. С. Пассивные УВЧ- и СВЧ-системы радиочастотной идентификации: архитектура и тенденции / А. С. Мучкаев // *Проблемы информатики*. – 2009. – Вып. 1 (2). – С. 68–74.
7. Николаенко А. Ю. Калибровка комбинированного многополюсного рефлектометра в системах радиочастотной идентификации / А. Ю. Николаенко, А. А. Львов, П. А. Львов // *Антенны*. – 2017. – № 8. – С. 17–22.
8. Рейзенкинд Я. А. Состояние и перспективы развития методов измерения параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ / Я. А. Рейзенкинд, В. А. Следков // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1988. – № 8. – С. 30–60.
9. Энген Г. Ф. Успехи в области СВЧ измерений / Г. Ф. Энген // *ТИИЭР*. – 1978. – № 4 (66). – С. 8–20.
10. Finkenzeller K. *RFID Handbook-Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication* / K. Finkenzeller. – 3d ed. – John Wiley & Sons, 2010. – 462 p.
11. Islam M. *Software Defined Radio for RFID Application* / M. Islam, M. A. Hannan, S. A. Samad, A. Hussain // *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science*. – San Francisco, USA, 2009. – Vol. I. – P. 1–4.
12. Kim W.-K. A Passive Circulator for RFID Application with High Isolation Using a Directional Coupler / W.-K. Kim, M.-Q. Lee, J.-H. Kim, H.-S. Lim, J. W. Yu, Jang B.-J., Park J. // *Proc. of the 36-th European Microwave Conf.* – Manchester, UK, 2006. – P. 196–199.
13. Lee J. A UHF Mobile RFID Reader IC with Self-Leakage Canceller / J. Lee, J. Choi, K. H. Lee, B. Kim, M. Jeong, Y. Cho, H. Yoo, K. Yang, S. Kim, S.-M. Moon, J.-Y. Lee, S. Park, W. Kong, J. Kim, T.-J. Lee, B.-E. Kim, B.-K. Ko // *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp.* – Honolulu, USA : IEEE, 2007. – P. 273–276.
14. L'vov A. A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-port Reflectometer and Optimization of Its Construction / A. A. L'vov, R. V. Geranin, N. Semezhnev, P. A. L'vov // *Proc. of 14th Conf. on Microwave Techniques*. – Pardubice, Czech Republic: IEEE, 2015. – P. 179–183.
15. L'vov A. A. A Novel Vector Network Analyzer Using Combined Multi-port Reflectometer / A. A. L'vov, A. Y. Nikolaenko, P. A. L'vov // *Proc. of 14th Conf. on Microwave Techniques*. – Pardubice, Czech Republic : IEEE, 2015. – P. 183–186.
16. L'vov A. A. A method of calibrating an automatic multiprobe measurement line / A. A. L'vov, K. V. Semenov // *Measurement Techniques*. – 1999. – Vol. 42, iss. 4. – P. 357–365.
17. Nikolaenko A. Yu. Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves / A. Yu. Nikolaenko, A. A. L'vov, P. A. L'vov, V. V. Komarov, S. P. Ivzhenko // *Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* – St. Petersburg : IEEE, 2017. – P. 960–964.
18. Solopekina A. A. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer / A. A. Solopekina, A. A. L'vov, N. Semezhnev // *Proc. of the 2014 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. – Saratov, Russia : IEEE, 2014. – P. 356–362. – DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958776.
19. Tan J. A RFID Architecture Built in Production and Manufacturing Fields / J. Tan, H. Wang, D. Li, Q. Wang // *3rd Int. Conf. on Convergence and Hybrid Information Technology*. – Busan, South Korea : IEEE, 2008. – Vol. 1. – P. 1118–1120.
20. Wang J. RFID Assisted Object Tracking for Automating Manufacturing Assembly Lines / J. Wang, Z. Luo, E. C. Wong, C. J. Tan // *IEEE Int. Conf. on e-Business Engineering*. – Hong Kong, China : IEEE, 2007. – P. 48–53.

References

1. Grigoreva A. Tendentsii razvitiya RFID-tehnologii: obzor mirovogo i rossiyskogo rynka [RFID technology development trends: a review of the global and Russian market]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2016, no. 4, pp. 44–49.
2. Gupta K., Garg R., Chadha R. *Mashinnoe proektirovanie SVCh ustroystv* [Computer Aided Design of Microwave Circuits]. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1987. – 432 p.
3. Linnik Yu. V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least Squares Method and the Basics of Observed Data Processing Theory]. Moscow, GIFML Publ., 1958. 334 p.
4. Lvov A. A., Meshchanov V. P., Svetlov M. S., Nikolaenko A. Yu. Optimalnoe otsenivanie parametrov SVCh-tsepey s pomoschy avtomaticheskikh analizatorov tsepey. Algoritmy obrabotki nablyudaemykh dannykh [Optimal Estimation of Microwave Parameters Using the Automatic Network Analyzers. Processing Algorithms of Measured Data]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2018, no. 8, pp. 147–154.
5. Lvov A. A., Morzhakov A. A., Zhukov A. V. Statisticheskii analiz tochnostnykh kharakteristik metoda mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Statistical analysis of the accuracy characteristics of the multi-probe measuring line method]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Electronic Engineering. Series 1. Microwave electronics], 1990, iss. 1 (425), pp. 50–57.
6. Moutchkaev A. S. Passivnye UVCh- i SVCh-sistemy radiochastotnoy identifikatsii: arhitektura i tendentsii [Passive UHF and microwave RFID systems: architecture and trends]. *Problemy informatiki* [Computer Science Issues], 2009, iss. 1 (2), pp. 68–74.
7. Nikolaenko A. Yu., Lvov A. A., Lvov P. A. Kalibrovka kombinirovannogo mnogopolyusnogo reflektometra v sistemakh radiochastotnoy identifikatsii [Calibration of a Combined Multiport Reflectometer in Radio Frequency Identification Systems]. *Antenny* [Antennas], 2017, no. 8, pp. 17–22.

8. Reyzenkind Ya. A., Sledkov V. A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov izmereniya parametrov dvukhpolyusnikov i chetyrekhpolyusnikov na SVCh [State and prospects of methods development for measuring the parameters of microwave loads and two-ports]. *Zarubezhnaya elektronika* [Foreign Electronics], 1988, no. 8, pp. 30–60.
9. Engen G. F. Uspekhi v oblasti SVCh izmereniy [Advances in Microwave Measurement]. *Trudy IIER* [Proc. of IEEE], 1978, no. 4 (66), pp. 8–20.
10. Finkenzeller K. *RFID Handbook-Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2010. 462 p.
11. Islam M., Hannan M. A., Samad S. A., Hussain A. Software Defined Radio for RFID Application. *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science*. San Francisco, USA, 2009, vol. I, pp. 1–4.
12. Kim W.-K., Lee M.-Q., Kim J.-H., Lim H.-S., Yu J. W., Jang B.-J., Park J. A Passive Circulator for RFID Application with High Isolation Using a Directional Coupler. *Proc. of the 36-th European Microwave Conf*, Manchester, UK, 2006, pp. 196–199.
13. Lee J., Choi J., Lee K. H., Kim B., Jeong M., Cho Y., Yoo H., Yang K., Kim S., Moon S.-M., Lee J.-Y., Park S. Kong W., Kim J., Lee T.-J., Kim B.-E., Ko B.-K. A UHF Mobile RFID Reader IC with Self-Leakage Canceller. *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp.* Honolulu, USA, IEEE, 2007, pp. 273–276.
14. L'vov A. A., Geranin R. V., Semezhnev N., L'vov P. A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-port Reflectometer and Optimization of Its Construction. *Proc. of 14th Conf. on Microwave Techniques*. Pardubice, Czech Republic, IEEE, 2015, pp. 179–183.
15. L'vov A. A., Nikolaenko A. Y., L'vov P. A. A Novel Vector Network Analyzer Using Combined Multi-port Reflectometer. *Proc. of 14th Conf. on Microwave Techniques*. Pardubice, Czech Republic, IEEE, 2015, pp. 183–186.
16. L'vov A. A., Semenov K. V. A method of calibrating an automatic multiprobe measurement line. *Measurement Techniques*, 1999, vol. 42, iss. 4, pp. 357–365.
17. Nikolaenko A. Yu., L'vov A. A., L'vov P. A., Komarov V. V., Ivzhenko S. P. Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves. *Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, IEEE, 2017, pp. 960–964.
18. Solopekina A. A., L'vov, A. A., Semezhnev N. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer. *Proc. of the 2014 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia, IEEE, 2014, pp. 356–362. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958776
19. Tan J., Wang H., Li D., Wang Q. A RFID Architecture Built in Production and Manufacturing Fields. *3rd Int. Conf. on Convergence and Hybrid Information Technology*. Busan, South Korea, IEEE, 2008, vol. 1, pp. 1118–1120.
20. Wang J., Luo Z., Wong, E. C., Tan C. J. RFID Assisted Object Tracking for Automating Manufacturing Assembly Lines. *IEEE Int. Conf. on e-Business Engineering*. Hong Kong, China, IEEE, 2007, pp. 48–53.

**Перспективные проекты и технологии, продвижением которых занимается
«Центр трансфера технологий» Астраханского государственного университета**

1. **ALBERT WELDING.** Проект представляет собой устройство для резки (CUT – 40A) и сварки металла двумя методами (MMA – 160A; TIG – 160A). Разработанное устройство от альтернатив отличается многофункциональностью (может заменить 3 разных устройства), компактность (325 мм х 290 мм х 80 мм) и портативность (вес 4,6 кг – человек может без труда носить данное устройство благодаря лямкам на плече).

2. **Дистанционный акустический концентратор гидробионтов (ДАКГСД)** представляет собой устройство, которое решает следующую задачу: концентрация определённой разновидности гидробионтов с помощью акустических волн для их дальнейшего вылова в заданной области водоёма.

3. **Механизированный комплекс для лова каспийской кильки** на свет с рыболовецкого судна, который позволит облавливать большие объёмы воды и поднимать стабильный улов быстрее альтернативных способов.

4. **Устройство для определения качества мёда.** Автономное портативное устройство позволит оперативно определить качество мёда по составу полисахаридов (сахароза, глюкоза, фруктоза), не требуя специальных знаний от человека и особых расходных материалов. Планируется создать переносное устройство размером не более 300 мм х 300 мм х 300 мм, которое будет способно определять качество мёда без использования химической обработки исследуемого образца.

5. **Система энергоснабжения на основе подповерхностных электромагнитных генераторов** позволит сократить расходы организаций на электроэнергию благодаря использованию гибридных плит, способных вырабатывать её в автономном режиме. Система состоит из следующих основных узлов: энергоплита, узел накопления энергии, узел управления и переключения энергопотоками. Каждая энергоплита состоит из двух поверхностей: на одной устанавливаются мощные магниты, а на другой – соосно к ним катушки, скоммутированные для получения необходимых напряжений и токов. Вырабатываемые токи при нажатии на плитку служат для подзарядки двух аккумуляторов, которые в дальнейшем можно использовать, к примеру, для освещения помещений в ночное время. Система управления обеспечивает контроль и переключение вырабатываемой энергии для подзарядки того или иного аккумулятора. Сверху энергоплиты защищена резиновым покрытием.

6. **Разработка механизированного комплекса для приманивания, выращивания саранчи и переработки её в кормовую массу для рыб и птиц.** Комплекс разрабатываемых устройств предназначен для отлова, контролируемого выращивания и изготовления из саранчи кормовой массы для рыбной промышленности и иных сфер сельского хозяйства. Одно из устройств, путём привлечения насекомого ультрафиолетовым излучением, будет заманивать насекомое в зону действия всасывающего механизма, защищённого решёткой под небольшим напряжением. Насекомое, попавшее в радиус поражения данного устройства, после поражения током, отправляется в специальный отсек сушки и хранения. Другим устройством является инкубатор для контролируемого выращивания саранчи, который позволит вне зависимости от времени года подготавливать кормовую базу для нужд сельского хозяйства.

7. **Устройство для управления поведением насекомых-опылителей путём воздействия на их хеморецепторы.** Действие разрабатываемого устройства заключается в испарении и диффузии одного или нескольких компонентов нектара цветков культурных растений в воздухе. Результат данного процесса привлечёт насекомых-опылителей на нужный участок земли, где в итоге насекомое будет производить опыление.

8. **Навигационное устройство для людей с нарушением зрения.** Навигационное устройство в виде очков позволит максимально упростить и повысить комфортность передвижения людей с нарушением зрения как в закрытых помещениях, так и на улицах городов. Разрабатываемое устройство имеет два модуля: очки, способные определять расстояние до объекта и сигнализировать о препятствии владельцу; прибор с GPS-навигацией, имеющий голосовой навигатор, позволяющий прокладывать маршрут к месту назначения.

9. **Генератор низковольтного напряжения на основе рыбьей чешуи.** Генератор представляет из себя стельку для обуви, в которой расположены медные дорожки, к которым крепится чешуя. При оказании давления на поверхность стельки во время ходьбы будет питаться маломощный потребитель энергии, например система датчиков, следящих за жизненными показателями человека.

10. **Определитель цветов для людей с нарушениями зрения.** Компактное и автономное устройство, которое позволит человеку с нарушением зрения определять цвета объектов, облегчая ему многие процессы в жизни. Прибор состоит из микропроцессорного блока, датчиков, осветителя, динамика и видеокамеры, использует библиотеку компьютерного зрения для распознавания цветов и речевой модуль для голосовой поддержки.

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 15 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 (начала 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 учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал 1.0. В таблицах, подрисованных 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 – 0,75 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

Основная тематика журнала и требования к научному уровню представляемых статей – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/trebovaniya.pdf>.

Адрес и телефоны редакционно-издательского дома – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/address.pdf>.

Пример оформления текста статьи – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/primer.pdf>.

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/trasn_spisok_liter.pdf.

Дополнительные документы к статьям, предоставляемые авторами – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/dop_doc.pdf.

Переписка с авторами и порядок рецензирования статей – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/poryadok_recenz.pdf.

Условия и порядок оплаты статей – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/poryadok_oplaty.pdf.

RULES FOR THE AUTHORS – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/en-rules/rules-for-authors.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

2019
№ 4 (48)

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»

Редактирование, компьютерная правка *Н.Н. Сахно*
Верстка *Ю.А. Яценко*

Дата выхода в свет 30.01.2020 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 14,9. Усл. печ. л. 20,9.
Заказ № 4114. 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