

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



Информационные системы.

Информатика.

Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы.

Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и нанoeлектроника.

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества





ISSN 2500-316X

Э Л Е К Т Р О Н Н О Е С Е Т Е В О Е И З Д А Н И Е

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
- Мировоззренческие основы технологии и общества

- Information Systems. Computer Sciences. Issues of Information Security
- Multiple Robots (Robotic Centers) and Systems. Remote Sensing and Non-Destructive Testing
- Modern Radio Engineering and Telecommunication Systems
- Micro- and Nanoelectronics. Condensed Matter Physics
- Analytical Instrument Engineering and Technology
- Mathematical Modeling
- Economics of Knowledge-Intensive and High-Tech Enterprises and Industries
- Philosophical Foundations of Technology and Society

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 3**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 3**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3>

<https://www.rtj-mirea.ru>



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 3**

Дата опубликования 29 мая 2020 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 3
Publication date May, 29 2020.**

Журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: 6 раз в год.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

Six issues a year are published.

The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов ВАК РФ,
индексируется в
DOAJ,
РИНЦ (Science Index),
Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science
press of the State Commission for Academic Degrees and
Titles of Russian Federation.
The journal is indexed:
DOAJ, Science Index,
Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич — академик РАН, доктор
физ.-мат. наук, профессор, президент МИРЭА – Российского
технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва,
Российская Федерация. Scopus Author ID 35557510600,
ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov – Academician of the Russian Academy
of Sciences, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor,
President of MIREA – Russian Technological University
(RTU MIREA), Moscow, Russian Federation.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией Г.Д. Середина
Компьютерная верстка Л.Г. Семерня
119571, г. Москва, пр. Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Editorial staff:

Chief of the editorial staff Galina D. Seredina
Desktop publishing Larisa G. Semernya
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578
от 14.12.2018 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

Registration certificate Эл № ФС 77-74578,
issued in December 14, 2018 by the Federal Service
for Supervision of Communications, Information Technology,
and Mass Media of Russia.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	проф., д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
Банис Юрас Йонович	проф., хабилированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 16515798800.
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 .
Буслаева Татьяна Максимовна	проф., д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
Буш Александр Андреевич	проф., д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru.
Вахрушев Сергей Борисович	проф., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
Голованова Наталья Борисовна	проф., д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, проф., д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800.
Жуков Дмитрий Олегович	проф., д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
Кимель Алексей Вольдемарович	доцент, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848.
Кондратенко Владимир Степанович	проф., д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
Крамаров Сергей Олегович	проф., д.ф.-м.н., Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия, Scopus Author ID 56638328000.
Мишина Елена Дмитриевна	проф., д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru.
Пасечник Сергей Вениаминович	проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru.
Перно Филипп	проф., Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648.
Романов Михаил Петрович	проф., д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
Скотт Джеймс	проф., член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания, Scopus Author ID 35549214200.
Соколов Виктор Васильевич	проф., д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
Тимошенко Андрей Всеволодович	проф., д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
Фетисов Юрий Константинович	проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
Харин Юрий Семенович	член-корр. НАН Беларуси, проф., д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by.
Цветков Виктор Яковлевич	проф., д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
Yuras Banis	Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 56521711400.
Alexei A. Bokov	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 .
Tatyana M. Buslaeva	Dr. Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
Alexander A. Bush	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru.
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
Nataliya B. Golovanova	Dr. Sci. (Economics), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
Yury V. Gulyaev	Academician of the RAS, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 35562581800.
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
Alexey V. Kimel	Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848.
Vladimir S. Kondratenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation, Scopus Author ID 56638328000.
Elena D. Mishina	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru.
Sergey V. Pasechnik	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru.
Philippe Pernod	Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648.
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
Viktor P. Savinykh	Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
James F. Scott	Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, United Kingdom, Scopus Author ID 35549214200.
Viktor V. Sokolov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
Andrey V. Timoshenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
Yury K. Fetisov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
Yury S. Kharin	Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by.
Viktor Ya. Tsvetkov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Куликов А.А.** 7
Модель репринта объекта на изображении

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ. ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

- Романов А.М.** 14
Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника.

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Вишняков Р.Р.** 33
Моделирование фазового метода подавления зеркального канала приема

- Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен** 48
Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов с дифференциальной фазовой манипуляцией при наличии релейских замираний и гармонической помехи

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

- Кудж С.А., Кондратенко В.С., Rogov A.Ю., Сакуненко Ю.И.,
Дружинин Е.А.** 59
Сорбционный кабельный сенсор с большим диапазоном чувствительности и области его применения

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Силкина У.И., Баландин В.А.** 81
Дискриминантный анализ параметров вариационной пульсометрии

ЭКОНОМИКА НАУКОЕМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВ

- Ломоносова Н.В., Петрусевиц Д.А.** 92
Проблемы и тенденции процесса наноиндустриализации в РФ

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

- Kulikov A.A.** 7
The model of an object reprint in an image

MULTIPLE ROBOTS (ROBOTIC CENTERS) AND SYSTEMS. REMOTE SENSING AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

- Romanov A.M.** 14
A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics.

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Vishnyakov R.R.** 33
Simulation of the image rejection phase method

- Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Do Trung Tien** 48
Noise immunity of autocorrelation demodulator of signals with differential phase shift keying in the presence of rayleigh fading and harmonic interference

ANALYTICAL INSTRUMENT ENGINEERING AND TECHNOLOGY

- Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Rogov A. Yu., Sakunenko Yu.I.,
Druzhinin E.A.** 59
Sorpton cable sensor with large sensing range and fields of its application

MATHEMATIC MODELING

- Silkina U.I., Balandin V.A.** 81
Discriminant analysis of variational pulsometry parameters

ECONOMICS OF KNOWLEDGE-INTENSIVE AND HIGH-TECH ENTERPRISES AND INDUSTRIES

- Lomonosova N.V., Petrusevich D.A.** 92
Problems and trends in the nanoindustry development in Russia

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-7-13>



УДК 004.932

Модель репринта объекта на изображении

А.А. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: tibult41@gmail.com

Представлена проблематика распознавания (идентификации) лицевых изображений. Показано различие распознавания и идентификации лицевых изображений. Для решения проблемы идентификации разработана модель репринта объекта на изображении. Данная модель решает проблему посредством представления объекта в 3-мерном виде, что позволяет оценить и сформировать необходимые характеристики объекта в полном объеме, тогда как в 2-мерном виде это сделать невозможно. Модель репринта объекта на изображении может использоваться для формирования репринта любых пространственных объектов. Для обучения модели репринта объекта на изображении используется многослойная нейронная сеть, которая обучается последовательно. Для учета допустимых изменений ракурса, различных помех и разных уровней освещенности разработан локальный детектор для модели идентификации лицевых изображений. Бинарное значение, являющееся результатом обработки модели, представляемое как активация, определяет отношение конкретного изображения к соответствующему классу. Локальный детектор является не только основным элементом модели репринта объекта на изображении, но это еще и отдельная математическая конструкция. Он принимает входные данные в качестве двумерных изображений. Разработанная модель репринта объекта на изображении полностью решает проблему идентификации человека по лицевому изображению в целом в условиях помех и независимо от изменения ракурса.

Ключевые слова: нейронная сеть, распознавание изображений, распознавание образов, модель идентификации, идентификация лицевых изображений.

Для цитирования: Куликов А.А. Модель репринта объекта на изображении. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):7-13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-7-13>

The model is a reprint of an object in the image

Aleksandr A. Kulikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: tibult41@gmail.com

The problem of facial image recognition (identification) is presented. The difference between facial image recognition and identification is shown. To solve the identification problem, a model of object reprint in the image was developed. This model solves the problem by representing the object in 3-dimensional form, which makes it possible to evaluate and form the necessary characteristics of the object in full, whereas in 2-dimensional form, it is impossible to do this. The model of an object reprint in an image can be used to create a reprint of any spatial objects. To train a reprint model of an object in an image, a multi-layer neural network is used, which is trained sequentially. A local detector for the facial image identification model has been developed to account for acceptable changes in angle, various noise, and different light levels. The binary value that is the result of model processing, represented as activation, determines the relation of a particular image to the corresponding class. The local detector is not only the main element of the model of the object reprint in the image, but it is also a separate mathematical construction. It accepts input data as two-dimensional images. The developed model of object reprint on the image completely solves the problem of identifying a person from the facial image as a whole in conditions of interference and regardless of changes in the angle.

Keywords: neural network, image recognition, identification model, facial image identification.

For citation: Kulikov A.A. The model is a reprint of an object in the image. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):7-13 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-7-13>

Большое количество работ [1–7], связанных с идентификацией лицевых изображений, не решает саму проблему идентификации, а именно, отношение конкретного лица (класса) к исходному изображению. Проблема распознавания тесно связана с проблемой идентификации. Различие заключается в следующем: распознавание лицевого изображения состоит в нахождении на фотографии или в видеоматериале признаков лица, а идентификация – в соотнесении лицевого изображения, конкретно найденного на фотографии или в видеоматериале с помощью распознавания, с лицевым изображением, хранящимся в системе идентификации. Главная сложность метода идентификации по лицевому изображению состоит в том, что система должна идентифицировать человека при различных «помехах», внешних изменениях лица (например, пластика, косметика и др.) и, самое главное, независимо от изменения ракурса. Для решения этой проблемы в статье предложена модель репринта (представления) объекта (МРО) на изображении, которая использует методы восстановления трехмерных характеристик объекта из его двумерных характеристик. Эта модель может использоваться для формирования репринта любых пространственных объектов. Она представляет собой последовательность уровней репринта $E_0, \dots, E_n$, состоящих из отдельных локальных детекторов (ЛД) признаков и входных данных. Для обучения такой модели необходимо использование многослойной нейронной сети. Многослойная нейронная сеть должна обучаться последовательно.

В ходе обработки входных данных результат, полученный на предыдущем уровне, передается на вход последующего уровня для получения итогового результата, который в свою очередь представляется не только в виде значения функции активации ЛД, но также и в виде совокупности параметров объекта обрабатываемым ЛД. В совокупности все это называется входными данными для ЛД.

На вход уровня E_0 необходимо подать данные локальных участков покадровых последовательностей изображений, извлекаемых из видеоизображения. После обучения первого уровня видеофрагменты представляются в виде графов (рис. 1).

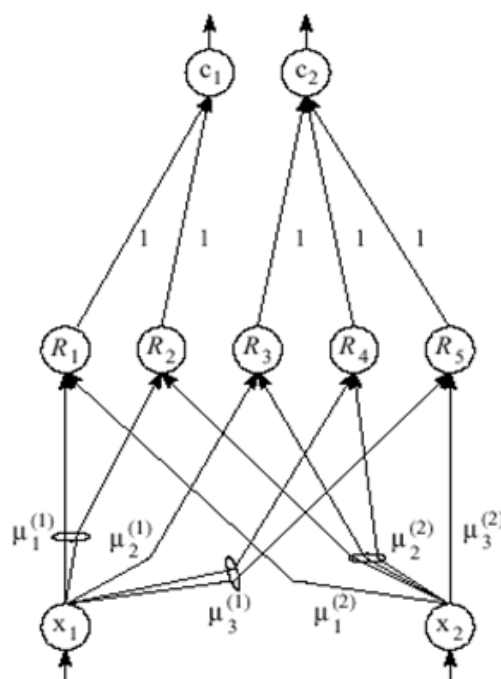


Рис. 1. Представление видеофрагмента в виде графа:

x – изображение на входе, R – набор покадровых последовательностей, c – результат на выходе.

Обученные на первом уровне локальные детекторы, являются узлами графа. Каждый i -ый уровень для $i \neq 0$ осуществляет локальную группировку данных. Все остальные уровни обучаются таким же образом. Обученная модель может представить изображение, извлеченное из видеофрагмента, в виде ограниченного количества ЛД. В каждом локальном детекторе содержится представление комплексного объекта.

Модель репринта объекта на изображении должна содержать:

- количество и локальное расположение детекторов D_i ;
- количество кластеров K_c для каждого уровня E_c ;
- количество уровней репринта $E_0, \dots, E_n$;
- внутренние параметры детекторов.

Например, изображения $x_n \in X$ в функции распознавания изображений " $g: X \rightarrow Y$ " представлены в виде вектора длины n атрибута данной функции. Множество классов $y \in Y$, используемых в этой функции, представлены в виде значения этой функции, которое в свою очередь модифицируется под конкретно поставленную задачу.

Для проверки модели распознавания объекта на изображении используем функцию $h: X \rightarrow Y$ для подмножества из множества парных атрибутов и значений $D = \{(x_0, y_0), \dots, (x_m, y_m)\}$,

которая в свою очередь аппроксимирует функцию распознавания g во всей области определения. Входные данные изображения необходимо подать на первый слой модели распознавания, чтобы вычислить h . Далее необходимо последовательное выполнение активации ЛД для каждого следующего уровня модели распознавания лицевых изображений. Бинарное значение, представляемое как активация, является результатом обработки модели и определяет отношение конкретного отдельного изображения к соответствующему классу. Это бинарное значение имеет два состояния:

1 – на выходе модели рассчитывается вероятностная оценка параметров изображения. Для решения задач классификации можно использовать данную модель в исходном виде. Множество классов $y \in Y$ состоит из двух элементов и равно $\{0,1\}$. Функция $g = 1$, если изображение содержит объект, относящийся к необходимому классу.

0 – в противном случае.

Задача идентификации изображения объекта среди множества классов состоит из:

1) отношения последовательной проверки объекта изображения к экземпляру модели идентификации лицевых изображений, т.е. функция $g' = \{g_1, g_j\}$. $g' \in X'$, величины которой – совокупность классов Y' , для i -го класса $Y' = \{y_i, \bigcup_{j \neq i} y_j\}$;

2) для каждого конкретного класса происходит обучение модели.

Схема модели, состоящая из двух уровней репринта, представлена на рис. 2.

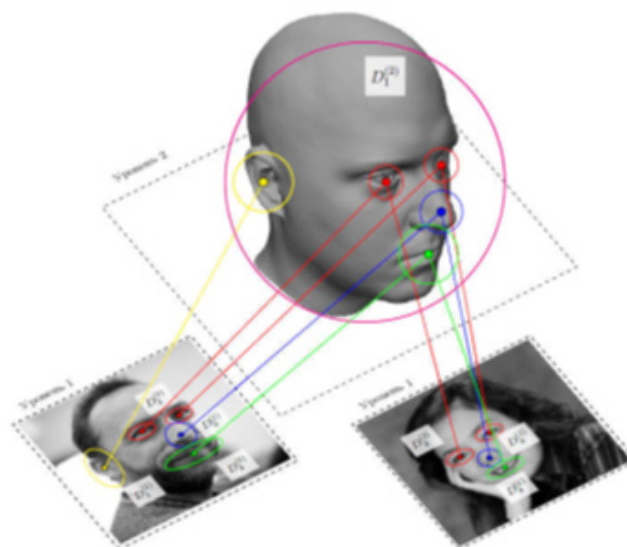


Рис. 2. Модель представления объектов, содержащая два уровня репринта.

Локальный детектор является не только основным элементом модели репринта объекта на изображении, но это еще и отдельная математическая конструкция. Его роль близка к роли нейронов искусственной нейронной сети. Результаты обработки информации в ЛД на предыдущем уровне поступают на вход локального детектора. Выходные данные локального детектора отправляются на следующий уровень модели.

Дадим определение локального детектора. Допустим, существует некоторая совокупность n трехмерных точек с заданными векторными координатами. Такая совокупность является матрицей размером $3 \times n$, которая в свою очередь является множеством B .

Проекцию трехмерных точек на плоскости, можно описать как $Br(B) = CB$, где C является матрицей. Исходя из определения локального детектора, результат решения такой матрицы будет состоять из массива точек b с координатами (x, y) . Такое определение ЛД четко описывает структуру, поведение и результат работы детектора в модели идентификации лицевых изображений. $Mr(M, B) = M$ – операция аффинной трансформации в трехмерном пространстве. M – матрица. Проекция объекта – $b_0 = Br(B)$. Приведем пример. Допустим, существует некоторая совокупность некоторых матриц трансформаций $M_1, \dots, M_m$ и некоторая совокупность проекций $b_1, \dots, b_m$, таких, что $b_j = Br(Tr(M_j, B))$. Тогда модель идентификации лицевых изображений для таких совокупностей будет использовать функции $D_I(b_j) = b_0$; $DM(b_j) = M_j$, что и является в данном случае локальным детектором. ЛД использует совокупность представлений объекта в трехмерном виде. Для любого представления объекта он способен не только определить представление измененного объекта, но и определить изначальную форму объекта.

Универсальность определения ЛД позволит избавиться от формы объекта, когда использование формы объекта не нужно. Например, когда $b_i = T_i b$, $b_j = T_j B$, b_i, b_j – представление объекта, то верна следующая формула:

$$\begin{cases} D_I(b_i) = D_I(b_j) \\ \frac{D_T(b_i)}{D_I(b_j)} = \frac{T_i}{T_j} \end{cases} \quad (1)$$

Дополним определение ЛД для объектов, которые относятся к разным классам.

1. Пусть $B_0, \dots, B_n$ – совокупность объектов.
2. $Y_0, \dots, Y_n$ – совокупность классов.
3. $y(B) = Y$ – определение принадлежности трехмерного объекта к конкретному классу.

Такое определение локального детектора в модели идентификации лицевых изображений позволяет точно сопоставить трехмерный (3D) объект определенному классу.

Приведем функцию однокомпонентной классификации y'_k для некоторого класса Y_k такую, что

$$y'_k(B_i) = \begin{cases} 1, y(b_j) = Y_k, \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Тогда $(D_I^k D_T^k)$ – дискриминативный ЛД для класса Y_k , если он задан функциями D_I^k, D_T^k , такими, что

$$\begin{cases} D_I^k(B_i) = y'_k(B_i), \\ D_T^k(B_i) = \begin{cases} T_i, D_I^k(B_i) = 1, \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Локальный детектор должен выполнять:

- 1) распознавание объекта,
- 2) определение конкретной трансформации применимой к изображению.

Для оценки эффективности работы ЛД дадим определение понятию функции ошибки восстановления трансформации:

$$J(D_T, b, T) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m |D_T(b^{(i)}) - T^{(i)}|^2. \quad (4)$$

ЛД принимает входные данные в виде двумерных (2D) изображений. Двумерные изображения, а, следовательно, и сам локальный детектор, не имеет данных о векторных свойствах объекта, а именно, о дополнительной координате Z . В случае, если бы координата Z была известна, то определение трансформации объекта была бы простой задачей, не требующей специализированных моделей с использованием локальных детекторов.

Для данной особенности ЛД существуют следующие признаки:

– Возьмем необходимое количество трансформированных объектов лицевых изображений b_i, b_j , которым отвечают T_i, T_j . Для случая, когда $b_i \approx b_j$, но $T_i \neq T_j$ ЛД не сможет корректно восстановить измененный объект по изображению. Таким образом, $D_T(b_i) \approx D_T(b_j)$.

– Когда 3D объекты B и Q , относящиеся к разным классам Y_1, Y_2 , дают похожие проекции $b \approx q$, такой же результат получается для функции идентификации ЛД, т.е. $D_I(b) \approx D_I(q)$.

Есть такие вариации трансформации (T) и изображений объекта, для которых нельзя построить ЛД ($J \rightarrow 0$). Негативно сказываются любые возможные отклонения 3D форм объектов лицевых изображений на различные проекции (лицевых изображений), момент изменчивости лицевого изображения объекта увеличивает среднее значение ошибки в пределах одного класса. Возможно, существует отрицательная корреляция между точностью восстановления измененного объекта изображения, размером лицевого изображения и множества лицевых изображений. Репринт полного объекта лицевого изображения с помощью только одного ЛД является сложной задачей, которая превосходит по сложности задачу распознавания.

На первом уровне модели представлен ЛД $D_I(0)$, ансамбли и значения которого различны для каждого конкретного объекта лицевого изображения, который может реагировать на участки объекта лицевого изображения при различном ракурсе. Данные из первого уровня модели локального детектора необходимы для обучения высокоуровневого ЛД $D_j^{(1)}$, находящим представлением для композиций ЛД, а именно, 3D карта признаков – ЛД первого уровня, на которой локальные детекторы размещены в соответствии с данными эквивариантных трансформаций. Принадлежность объекта к категории определяет функция идентификации ЛД второго уровня.

Таким образом, предложенная модель репринта объекта на изображении полностью решает проблему идентификации человека по лицовому изображению в целом в условиях помех и независимо от изменения ракурса.

Литература:

1. Коротков А. Е., Трифонова Е. Е. Алгоритм расчета расстояния Левенштейна с пороговым значением. *Естественные и технические науки*. 2012;1:317-322.
2. Куликов А.А., Демкин Д.В., Мелков А.Е. Анализ влияния максимальной степени сжатия изображения лица на результат распознавания лица. *Перспективы науки*. 2014;3(54):104-108.
3. Камышинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия - Телеком, 2002. 94 с. ISBN 5-93517-094-9
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер с англ. М.: Вильямс, 2008. 1104 с. ISBN 978-5-8459-0890-2

5. Брилюк Д.В., Старовойтов В.В. Распознавание человека по изображению лица и нейросетевые методы: обзорный препринт. Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. 54 с.
6. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: учебн. пособие для ВУЗов. Киев: Издательский дом "Слово", 2008. 344 с.
7. Старовойтов В.В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1997. 284 с.
8. Куликов А.А. Алгоритм нейронной сети NEFCClass M и реализация алгоритма в среде Matlab. *Информационные технологии моделирования и управления*. 2013;3(81):262-268.
9. Куликов А.А. Система автоматической идентификации изображения лица персоны по видеоизображению. Материалы межвуз. студен. науч.-практ. конф. Карьера и образование – 2013. М.: Изд-во МГОУ имени В.С. Черномырдина, 2013. С. 99-100.
10. Балдин А.В., Елисеев Д.В. Адаптируемая модель данных на основе многомерного пространства. *Наука и образование*: [электронный журнал]. 2010. № 10. <http://technomag.edu.ru/doc/161410.html>
11. Елисеев Д.В., Балдин А.В. Алгебра многомерных матриц для обработки адаптируемой модели данных. *Наука и образование*: [электронный журнал]. 2011. № 7. <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html>
12. Korotkov A. Database index for approximate string matching. In: Proc. 4th Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. SYRCoSE '10. 2010. P. 136-140. <https://doi.org/10.15514/syrco-se-2010-4-27>
13. Etemad K., Chellapa R. Discriminant Analysis for Recognition of Human Face Images. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1997;14(8):1724-1733. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.001724>

References:

1. Korotkov A.E., Trifonova E.E. Algorithm for calculation of the Levenshtein distance with a threshold value. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natur. Tech. Sci.* 2012;1:317-322 (in Russ.).
2. Kulikov A.A., Demkin D.V., Melkov A.E. The Analysis of the Maximum Face Compression Impact on Face Recognition Result. *Perspektivy nauki = SCIENCE PROSPECTS*. 2014;3(54):104-108 (in Russ.).
3. Kamyshinskii V.I., Smirnov D.A. *Neironnye seti i ikh primeneniye v sistemakh upravleniya i svyazi* (Neural networks and their application in control and communication systems). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2002. 94 p. (in Russ.). ISBN 5-93517-094-9
4. Khaikin S. *Neironnye seti: polnyi kurs* (Neural networks: full course). Moscow: Vil'yams; 2008. 1104 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8459-0890-2
5. [Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. NJ: Prentice Hall; 1998. 798 p.]
5. Brilyuk D.V., Starovoitov V.V. *Raspoznavanie cheloveka po izobrazheniyu litsa i neirosetevye metody: obzorny preprint* (Facial recognition and neural network methods: a review preprint). Minsk: Institute of Tech. cybernetics of NAS of Belarus; 2001. 54 p. (in Russ.).
6. Zaichenko Yu.P. *Nechetkie modeli i metody v intellektual'nykh sistemakh: uchebn. posobie dlya VUZov* (Fuzzy models and methods in intelligent systems). Kiev: Slovo Publishing House; 2008. 344 p. (in Russ.).
7. Starovoitov V.V. *Lokal'nye geometricheskie metody tsifrovoi obrabotki i analiza izobrazhenii* (Local geometric methods of digital image processing and analysis). Minsk: Institute of Tech. cybernetics of NAS of Belarus; 1997. 284 p. (in Russ.).
8. Kulikov A.A. NEFCclass M neural network algorithm and implementation of the algorithm in Matlab. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya = Information technologies modeling and management*. 2013;3(81):262-268 (in Russ.).
9. Kulikov A.A. A system for automatic identification of a person's face image from a video image. In: Proc. Career and education-2013. Moscow: MGOU Publishing House; 2013. P. 99-100 (in Russ.).
10. Baldin A.V., Eliseev D.V. Adaptive data model based on the multidimensional Electron space. *journal. Nauka i obrazovanie = Science & education* [electronic journal]. 2010. № 10 (in Russ.). <http://technomag.edu.ru/doc/161410.html>
11. Eliseev D.V., Baldin A.V. Algebra of multidimensional matrices for processing an adapted data model. *Nauka i obrazovanie = Science & education* [electronic journal]. 2011. № 7 (in Russ.). <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html>
12. Korotkov A. Database index for approximate string matching. In: Proc. 4th Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. SYRCoSE '10. 2010. P. 136-140. <https://doi.org/10.15514/syrco-se-2010-4-27>
13. Etemad K., Chellapa R. Discriminant Analysis for Recognition of Human Face Images. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1997;14(8):1724-1733. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.001724>

Об авторе:

Куликов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID - 0000-0002-8443-3684

About the author:

Alexander A. Kulikov, Cand. Sci. (Engineering), senior lecturer, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID - 0000-0002-8443-3684

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>



УДК 004.896, 621.865.8

Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботом различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника

А.М. Романов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: romanov@mirea.ru

В работе проводится обзор роботов различного масштаба и назначения. В ходе обзора анализируются применяемые аппаратные и программные решения и обобщаются наиболее распространённые структурные схемы систем управления. По результатам обзора проводится анализ подходов к масштабированию систем управления, применению алгоритмов интеллектуального управления, обеспечению отказоустойчивости, снижению массогабаритных размеров элементов систем управления, свойственных разным классам роботов. Целью работы является поиск общих подходов, применяемых в различных областях робототехники для построения на их основе единой методологии проектирования масштабируемых интеллектуальных систем управления роботом с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе. Данная часть посвящена экстремальной робототехнике и обобщению выводов по всему циклу работ. В работе отмечается возможность и необходимость развития единых подходов к созданию роботов различного масштаба и назначения. Отмечается, что в отличие от многих зарубежных стран, в Российской Федерации надо учитывать серьезные ограничения на элементную базу, которые не позволяют свободно проводить конверсию технологий между гражданской, военной и космической робототехникой. В связи с этим, предлагается провести анализ взаимозаменяемой российской и зарубежной элементной базы, выделить технические решения в области создания элементов систем управления и организации информационного обмена между ними, которые могли бы быть реализованы как на зарубежной, так и на отечественной элементной базе, и на их основе создать концептуальную модель масштабируемой интеллектуальной системы управления с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе.

Ключевые слова: робототехника, экстремальная робототехника, подводные роботы, космические роботы, военные роботы.

Для цитирования: Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):14-32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>

A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics

Aleksey M. Romanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: romanov@mirea.ru

A review of robotic systems is carried out. The paper analyzes applied hardware and software solutions and summarizes the most common block diagrams of control systems. The analysis of approaches to control systems scaling, the use of intelligent control, achieving of fault tolerance, reducing the weight and size of control system elements belonging to various classes of robotic systems is carried out. The goal of the review is finding common approaches used in various areas of robotics to build on their basis a uniform methodology for designing scalable intelligent control systems for robots with a given level of fault tolerance on a unified component base. This part is dedicated to extreme robotics and the generalization of the conclusions for the whole review. The paper notes the possibility and necessity of developing common approaches to the creation of robots of various sizes and purposes. It is noted that, in contrast to many foreign countries, in the Russian Federation developers must consider the serious limitations on the electronics components, which do not allow for the free conversion of technologies between civilian, military and space robotics. In this regard, it is proposed to analyze the interchangeable Russian and foreign microelectronic components, to find technical solutions in the field of the control systems and communication between them, which could be implemented both in foreign and Russian microelectronics, and to create on their basis a conceptual model of scalable intelligent control system with a required level of fault tolerance. The model should be based on a unified set of components.

Keywords: robotics, extreme robotics, underwater robots, space robots, military robots.

For citation: Romanov A.M. A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):14-32 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>

Введение

Целью данного цикла работ является обзор и анализ существующих и перспективных робототехнических систем различного масштаба и назначения с точки зрения обобщения основных тенденций в области проектирования роботов и требований, предъявляемых к их аппаратному и программному обеспечению.

На основе анализа широкого спектра работ [1–6], так и или иначе затрагивающих вопросы классификации в робототехнике, было выделено три наиболее крупных класса роботов по области применения: промышленная, сервисная и экстремальная робо-

техника. Данная часть посвящена обзору и анализу решений в области экстремальной робототехники, а также обобщению выводов по всему циклу работ.

Экстремальная робототехника

К экстремальной робототехнике относятся роботы, предназначенные для работ в опасных и вредных для человека условиях, а также в ситуациях, когда присутствие человека исключается. Данный класс роботов подразделяют на промышленную, космическую, подводную и военную робототехнику [2].

Подходы к построению роботов для работы в экстремальных условиях во многом повторяют те, что применяются в промышленной и сервисной робототехнике – модульность основных компонент, иерархичная структура системы управления и т. д. [2, 6, 5, 7]. Ключевым отличием являются существенно более высокие требования к элементной базе – её стойкости к внешним воздействиям, надежности, ремонтпригодности. В сервисной робототехнике часто вообще не рассматривают функционирование робота после поломки. Предполагается, что его можно отключить и дождаться, когда квалифицированный инженер проведет ремонт. В промышленных роботах в последние годы делается акцент на предсказание отказов, для того, чтобы заблаговременно переориентировать технологический процесс и планово провести профилактические работы. В экстремальной робототехнике, с одной стороны, вероятность отказа существенно выше за счёт воздействий агрессивной внешней среды, а с другой, как правило, отсутствует возможность провести какие-либо ремонтные работы до завершения миссии. Таким образом, робот должен продолжать свое функционирование даже в случае отказа части узлов. Это достигается за счёт использования специальной отказоустойчивой элементной базы [8], многократного резервирования наиболее важных узлов [9, 10], а также при помощи управляемой деградации [11, 12]. Под управляемой деградацией понимается набор технических решений, направленных на сохранение функциональности робота в случае выхода из строя отдельных его компонентов, сопровождаемое прогнозируемым ухудшением технических характеристик. Примером управляемой деградации является автоматический переход на бездатчиковые алгоритмы, управление электроприводом после отказа датчика положения или скорости. Рассмотрим эти подходы на примерах различных образцов экстремальной робототехники.

Промышленная экстремальная робототехника

Согласно [2] к промышленной экстремальной робототехнике относятся, в первую очередь, роботы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и роботы, применяемые для выполнения штатных технологических операций в зонах опасных для человека, например, на предприятиях атомной и химической промышленности. Сегодня в России и за рубежом создано и эксплуатируется большое количество роботов данного класса [13–17], которые предназначены для проведения дозиметрического контроля, тушения пожаров, разбора завалов и т. д. (рис. 1).

Данная категория экстремальной робототехники по применяемым техническим решениям наиболее близка к сервисным роботам. Многие решения в течение длительного периода времени отрабатываются в научных лабораториях на базе сервис-



Рис. 1. Роботы, относящиеся к промышленной экстремальной робототехнике:
а) Quince; б) ЛУФ-60; в) МРК-27-МА-БАЭС.

ных роботов, в том числе, под управлением ROS [14, 18, 19], а после – с минимальными изменениями используются для создания роботов, предназначенных для работы в опасных условиях [15, 19].

Несмотря на то, что неблагоприятные условия внешней среды могут существенно влиять на работу компонентов системы управления (так в атомной промышленности радиационное облучение в рабочей зоне робота может достигать 10 рентген в секунду, а температура – 300 градусов [2]), в описанных в научной литературе роботах редко применяются специализированные схемы резервирования с целью повышения отказоустойчивости, характерные, например, для космической робототехники. Роботы промышленной экстремальной робототехники во многих случаях строятся на стандартной элементной базе, предназначенной для бытовых применений, включая встраиваемые компьютеры, микроконтроллеры, сети стандартов Ethernet и IEEE 802.11, общепромышленные камеры и датчики расстояний [13, 15, 20]. Для снижения воздействия неблагоприятных условий окружающей среды на эти компоненты их защищают от агрессивных внешних воздействий, термоизолируют и термостабилизируют, а также, в случаях дистанционного управления, выносят наиболее критически важные компоненты из робота в командный пункт, находящийся в безопасной зоне [13]. В ряде случаев, для обеспечения надежности создаваемого робота, разработчики проводят дополнительные исследования стойкости применяемых ими общепромышленных компонентов к внешним воздействиям, например, к радиации [15].

Отдельно стоит отметить роботы для ликвидации чрезвычайных ситуаций, созданные по заказу военных ведомств и стоящие на вооружении действующих армейских подразделений, как правило, инженерных войск. Такие роботы стоит относить к военной робототехнике, так как при их разработке и проектировании накладываются дополнительные требования, связанные с возможностью их эксплуатации в условиях боевых действий.

Космическая робототехника

Современная космическая робототехника представлена довольно широкой номенклатурой роботов различного типа и назначения (рис. 2): манипуляционных, мобильных, в том числе антропоморфных [21].

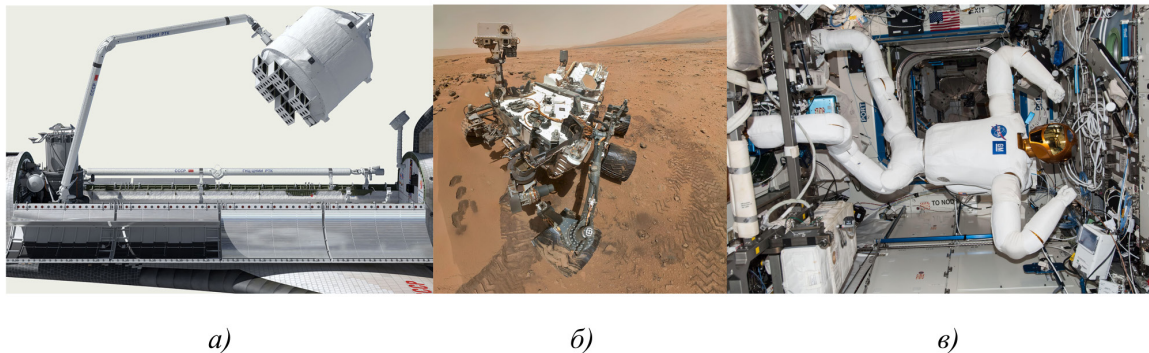


Рис. 2. Космические роботы: а) манипулятор Аист космического корабля Буран; б) мобильный робот-марсоход Curiosity; в) антропоморфный робот Robonaut.

Основными проблемами при создании космической техники являются широкий диапазон рабочих температур, постоянное воздействие космической радиации и тяжёлых заряженных частиц, жесткие ограничения на энергопотребление, массу и габариты, а также невозможность проводить какое-либо техническое обслуживание на большей части жизненного цикла изделия [22–24].

Существенное развитие программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в последнее десятилетие сделало эти микросхемы основой элементной базы современных космических аппаратов, в том числе и роботов [24–34]. Главными предпосылками для этого стало:

1. Наличие на рынке относительно большого выбора радиационно-стойких микросхем ПЛИС.
2. Возможность заменить однотипными микросхемами ПЛИС широкую номенклатуру заказных сверхбольших интегральных схем (СБИС), обладающих разным функционалом.
3. Возможность отладки проекта на дешевых микросхемах для бытовых применений с последующим выпуском изделия на базе радиационно-стойкой отказоустойчивой версии ПЛИС без изменения исходных кодов.
4. Возможность удаленной реконфигурации аппаратно-программного обеспечения ПЛИС после старта миссии с целью увеличения функционала или исправления ошибок, допущенных в ходе проектирования (в случае применения многократно программируемых микросхем).

Обобщённая структура системы управления космического робота представлена на рис. 3.

Она представляет собой трехуровневую систему как минимум с двукратным резервом. Непосредственное взаимодействие с датчиками и исполнительными устройствами осуществляется при помощи ПЛИС. Расчет регуляторов может производиться как непосредственно на ПЛИС [24], так и на встраиваемых компьютерах, работающих под управлением операционной системы реального времени [33], которые также используются для решения задач тактического уровня. На стратегическом уровне может быть использован как встраиваемый компьютер, так и ПЛИС, для которых разработаны высокопроизводительные софт-процессорные ядра, например Leon 3 [35]. Также на ПЛИС могут быть реализованы супервычислители для ускорения наиболее трудоёмких операций, таких как обучение нейронных сетей [34].

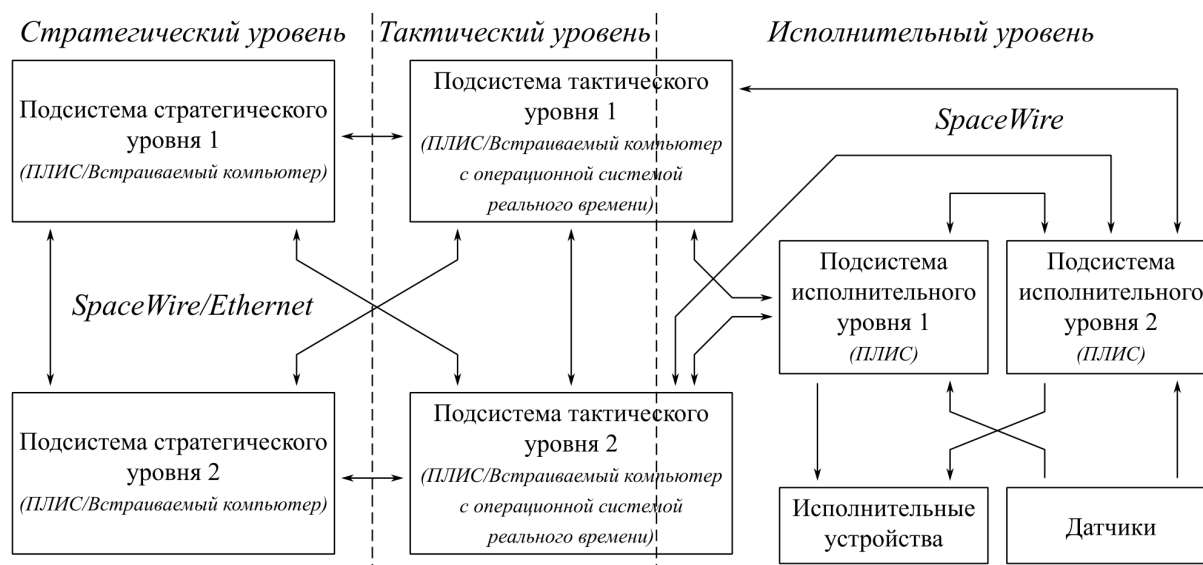


Рис. 3. Обобщенная структура системы управления космического робота.

Для связи между различными элементами систем управления в космической технике разработан и принят в качестве стандарта специализированный протокол SpaceWire [36], позволяющий передавать данные с пропускной способностью до 400 Мбит/с при расстоянии между узлами до 10 м. В то же время, в ряде космических роботов используются каналы информационного обмена, реализованные на базе Ethernet [33, 36, 37].

Несмотря на обилие работ, посвященных стандартизации и модульности в космической робототехнике, на сегодняшний день не существует общепринятого инструментария для создания аппаратно-программного обеспечения космических роботов. Многие проекты построены на оригинальном коде, который не предполагает расширение функционала за пределы, изначально определенные техническим заданием. Это связано как с высокими требованиями безопасности, предъявляемыми к аппаратно-программным решениям, используемым в космосе [37], так и с фактической невозможностью изменения функционала робота после его вывода в космическое пространство. В этом контексте интересным исключением является робот Robonaut 2, который, аналогично сервисным роботам, построен на базе операционной системы Ubuntu Linux и связке программных инструментариев ROS-OROCOS, но в то же время за счёт применения многократного резервирования и обширной внутренней диагностики, он соответствует всем требованиям по надежности и безопасности, что позволило успешно использовать его в течение нескольких лет в ходе миссии на международной космической станции [37].

Подводная робототехника

На сегодняшний день подводная робототехника представлена, в первую очередь, аппаратами научно-исследовательского и военного назначения. Последние в данном разделе рассматриваться не будут, так как по применяемым инженерным и технологическим решениям они ближе к военной робототехнике. Также стоит отметить, что подводные роботы, созданные для научно-исследовательских целей, активно используются при проведении поисково-спасательных операций и для организации под водой технического мониторинга в ходе строительных и ремонтных работ.

Современные подводные роботы (рис. 4) представлены в широком диапазоне размеров от малогабаритных субмарин весом в несколько килограмм [38, 39] до тяжелых аппаратов массой более 1 тонны [40]. Существуют роботы, как приводимые в движение гребными винтами, так и использующие для перемещения силу океанских течений (подводные глайдеры) [41].

Подводные роботы работают в среде непригодной и опасной для человека, но параметры этой среды существенно отличаются от аналогичных в космической и военной робототехнике. Так, под водой отсутствуют мощные источники ионизирующего излучения, температурный режим достаточно стабилен и позволяет использовать микроэлектронику, созданную для бытовых применений, отсутствует проблема отвода избыточного тепла от исполнительных органов и устройств управления. К тому же, массогабаритные ограничения в подводной робототехнике существенно ниже, чем у роботов других классов. Так, например, малогабаритными считаются роботы массой до 150 кг [40]. Это позволяет значительно проще решать проблему энергообеспечения, по сравнению с роботами наземного и воздушного базирования.

Основными проблемами подводной робототехники являются навигация, связь и герметизация исполнительных устройств. Поглощение водой электромагнитных и световых волн не позволяет использовать традиционные решения для определения пространственного положения робота, применяемые в других областях робототехники. А высокие давления, которые приходится выдерживать глубоководным аппаратам, требуют применения специальных технологий для создания исполнительных устройств. В то же время данные проблемы напрямую не влияют на структуру системы управления, применяемые в ней вычислительные устройства и средства информационного обмена. С этой точки зрения подводные роботы наибольшим образом похожи на сервисные. Устройства управления стратегического и тактического уровня в них выполняются на основе встраиваемых компьютеров под управлением операционных систем Linux и QNX, к которым подключаются подсистемы исполнительного уровня [39, 40]. Для связи между различными уровнями системы управления, так же, как в сервисной робототехнике, используется широкий спектр интерфейсов и протоколов от полевых шин на основе CAN и Ethernet до RS-232. Неоднократно случая использования ROS при создании подводных роботов. Данный программный инструмент используется как для реализации рабочего

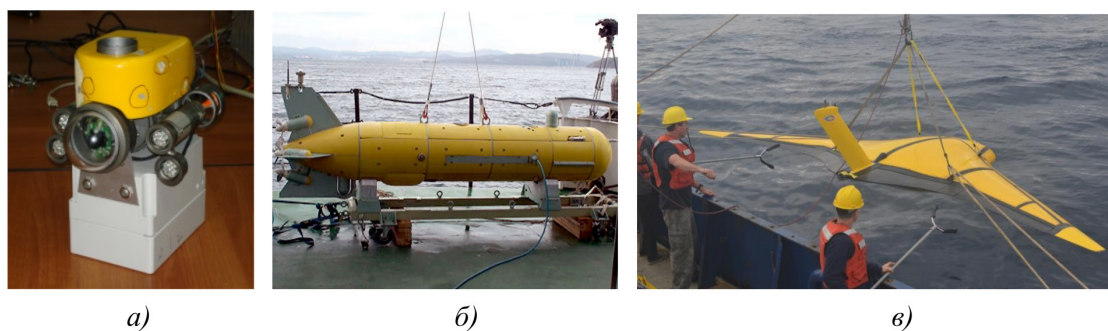


Рис. 4. Подводные роботы: а) малогабаритный автономный робот на базе телеуправляемой подводной лодки Гном; б) автономный необитаемый подводный аппарат Пилигрим; в) автономный подводный глайдер ZRay.

места оператора, так и непосредственно на самом автономном роботе [43–45]. Также часть разработчиков использует элементную базу любительских радиомоделей [46, 47], а проект ArduPilot даже имеет отдельный дистрибутив, предназначенный специально для подводной робототехники [48].

Интересно, что проблемам отказоустойчивости в подводных роботах уделяется существенно меньше внимания, чем в других областях экстремальной робототехники. С одной стороны, это связано с отсутствием агрессивных воздействий среды непосредственно на элементную базу, а с другой – с относительно низкой стоимостью производства, что свойственно, в первую очередь, малоразмерным аппаратам. Иными словами, вероятность потерять робота из-за отказа достаточно мала, а стоимость повышения надежности его системы управления сравнима с изготовлением нового робота. В тех же работах, которые посвящены проблемам обеспечения отказоустойчивости автоматических необитаемых подводных аппаратов, основной акцент делается на диагностику отказов и дальнейшую управляемую деградацию системы управления для безопасного завершения миссии и возвращения робота на поверхность [49].

Военная робототехника

Военная робототехника является, вероятно, самым активно развивающимся направлением экстремальной робототехники. Современная классификация охватывает все сферы военного применения роботов (рис. 5): на суше, в воздухе, на воде и под водой, разделяя их по целевому назначению на ударные, обеспечивающие, специального назначения и многофункциональные [1]. Аналогично космическим, военные роботы должны успешно функционировать в условиях широкого диапазона температур и под воздействием ионизирующего излучения, и в дополнение к этому, в условиях активного огневого и радиоэлектронного противодействия со стороны противника. В то же время, в отличие от космической, в военной робототехнике ремонт и модернизация оборудования на всем протяжении жизненного цикла не только возможны, но и являются необходимым условием обеспечения превосходства над потенциальным противником [1, 50–52].

Так же, как и для космической робототехники, в военных роботах используется специальная элементная база и специализированные технологии монтажа элементов системы управления. Важно отметить, что в подавляющем большинстве случаев для

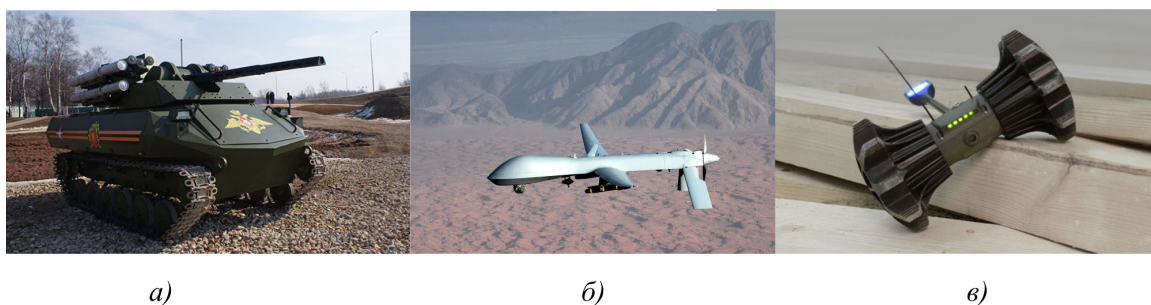


Рис. 5. Военные роботы: а) ударный наземный робот Уран-9;
 б) ударный беспилотный летательный аппарат Predator;
 в) малоразмерный разведывательный робот ЮЛА-Н.

военных роботов действует строгое ограничение на использование компонентов исключительно отечественного производства, что выражается для разработчика в существенном сокращении номенклатуры доступных изделий.

Точные данные о применяемых алгоритмах и аппаратно-программном обеспечении, находящихся в стадии опытной эксплуатации и принятых на вооружение военных роботов, как правило, являются секретной информацией и в России, и за рубежом. Тем не менее, по данным из открытых источников [1, 2, 7, 52–57], можно судить, что с точностью до используемой элементной базы в военной робототехнике используются те же подходы, что и в космической: иерархические системы управления с резервированием, активное применение ПЛИС и базовых матричных кристаллов (БМК), часто заменяющих их в отечественном аппаратном обеспечении. Основным отличием является более широкое использование изначально гражданских интерфейсов связи, таких как CAN, Ethernet, IEEE 802.11.

На сегодняшний день нет достоверной информации о применении ROS в военной технике, однако рядом исследователей ведутся работы в этой области, а концепция построения специальной военной версии ROS Military, по аналогии с ROS Industrial, неоднократно обсуждалась на международных конференциях в 2018 г. [37, 58, 59]. Очевидной мотивацией для работ в этом направлении является желание разработчиков обеспечить более быструю конверсию наиболее современных решений между гражданской сервисной и военной робототехникой.

Интеллектуальное и групповое управление в экстремальной робототехнике

На первых этапах развития экстремальной робототехники она была представлена исключительно телеуправляемыми роботами [2]. Это было обусловлено сложностью и недетерминированностью той среды, в которой работам данного класса необходимо функционировать. Однако с развитием технологий интеллектуального управления фокус разработчиков сместился в сторону полуавтономных и полностью автономных аппаратов [1, 7, 37, 46, 51, 55]. Это позволило преодолеть проблемы, в первую очередь, связанные с обеспечением надежности канала связи и низких транспортных задержек в нем. На сегодняшний день режим телеуправления до сих пор присутствует в большинстве роботов, относящихся к экстремальной робототехнике, однако для многих из них он уже не является основным. Текущим этапом развития данного класса роботов является переход от управления отдельными автономными роботами в режиме целеполагания к построению на их основе многоагентных систем, которые будут обладать большей живучестью и смогут функционировать на большей площади, чем отдельные роботы [60–62].

В экстремальной робототехнике на сегодняшний день присутствует множество задач, требующих применения искусственного интеллекта и группового управления. Отработка необходимых алгоритмов уже активно ведется на базе сервисных роботов, однако для их внедрения в роботы, функционирующие в экстремальных условиях, потребуются дополнительные исследования, связанные с обеспечением требуемого уровня надежности, и адаптация ранее созданного аппаратного и программного обеспечения под специфическую элементную базу.

Основные тенденции в области создания систем управления для экстремальной робототехники

а) Масштабирование в экспериментальной робототехнике достигается, в первую очередь, за счет модульного построения роботов. В то же время, за исключением космической техники, отсутствует строгая стандартизация интерфейсов информационного обмена, что ограничивает применения модулей, разработанных в рамках одного проекта, в других роботах. Также в экстремальной робототехнике отсутствуют единые подходы к созданию программного обеспечения. Однако, высокая заинтересованность разработчиков в конверсии алгоритмических и программных решений, апробированных ранее на сервисных роботах, создает предпосылки к использованию ROS, что уже подтверждается первыми удачными внедрениями.

б) Потребность в алгоритмах интеллектуального управления в экстремальной робототехнике крайне высока, поскольку только они могут обеспечить высокую автономность функционирования в неопределенной среде и позволить роботу выполнять задачу при отсутствии или нестабильном канале связи. В настоящее время отработка таких алгоритмов управления, как правило, проводится на сервисных роботах, а после они уже адаптируются для реализации в той или иной области экстремальной робототехники.

в) Среди всех классов роботов наибольшее внимание отказоустойчивости уделяется именно в экстремальной робототехнике. Она достигается за счёт применения специализированной элементной базы, многократного резервирования всех компонент системы управления, а также за счёт внедрения внутренней диагностики и управляемой деградации.

г) В тех областях экстремальной робототехники, где требуется минимизация массогабаритных размеров, активно используются микросхемы ПЛИС, которые позволяют реализовать на базе одного элемента микроэлектроники несколько микропроцессорных систем со всей необходимой периферией. В остальных случаях применяются решения на базе встраиваемых компьютеров, аналогично сервисной робототехнике.

Выводы

Из проведенного обзора следует, что, несмотря на различия в областях применения и требования, предъявляемые к оборудованию систем управления роботов разных классов, в целом, они строятся на схожих принципах (рис. 6), что допускает возможность создания единой методологии их проектирования.

Каждый класс роботов, с точки зрения применяемых технологий, обладает сильными сторонами, которые при разработке единых подходов к проектированию необходимо не только сохранить, но и по мере возможности распространить на другие классы.

Сильной стороной промышленной робототехники являются системы управления исполнительного уровня, полевые шины реального времени для подключения исполнительных устройств и датчиков к системам управления тактического уровня, а также алгоритмическое обеспечение для решения задач кинематики и динамики манипуляционных роботов. Вместе они обеспечивают прецизионную точность и повторяемость выполнения операции в сочетании с высокой динамикой, которые, как правило, не встречаются в роботах других классов, а также высокую степень взаимозаменяемости оборудования, в том числе выпускаемого разными производителями.

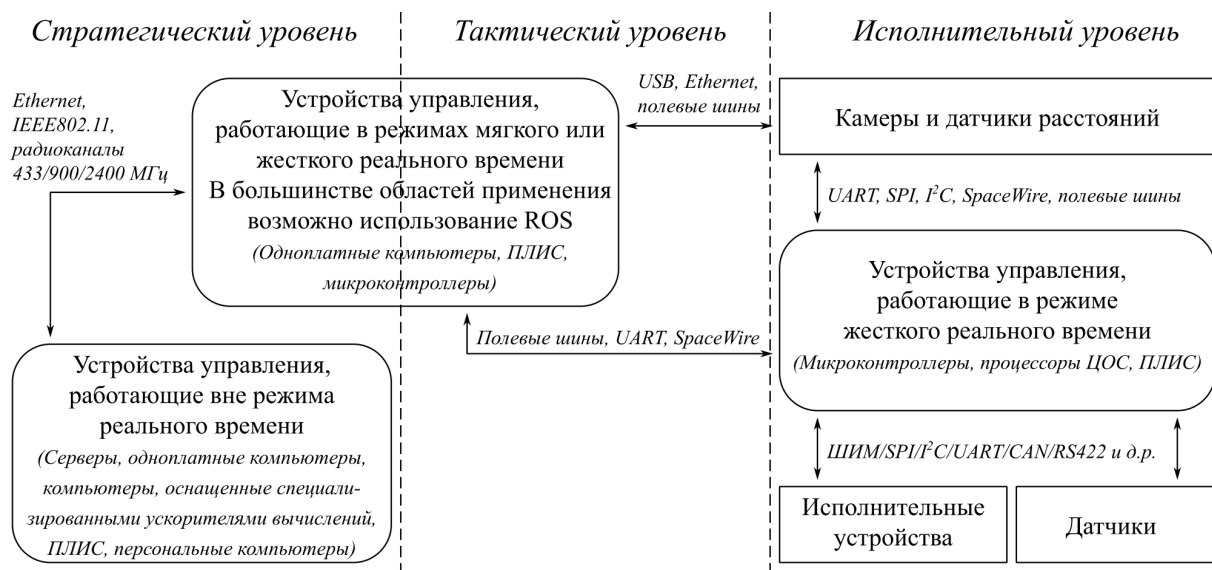


Рис. 6. Обобщенная структура системы управления робота, сформированная по результатам анализа.

Безусловно, сильнейшей стороной сервисной робототехники является программный инструментарий ROS и созданные на его базе программно-алгоритмические решения для систем управления тактического и стратегического уровня. На сегодняшний день они позволяют в кратчайшие сроки реализовывать новые поведенческие функции роботов, в том числе с использованием интеллектуальных алгоритмов.

Основное технологическое преимущество роботов, относящихся к экстремальной робототехнике, заключается в решениях для обеспечения надежности и отказоустойчивости в условиях неблагоприятных воздействий агрессивной среды функционирования.

Современные высокие темпы промышленного развития приводят к существенному сокращению сроков разработки новых роботов и делают актуальным не только максимальное использование ранее созданных заделов, но и конверсию технологий между различными классами робототехнических систем. Наибольший прогресс в этой области связан с распространением алгоритмического и программного обеспечения на базе ROS. В первую очередь, речь идет о промышленной робототехнике (проект ROS Industrial), но также можно отметить и первые опыты успешного применения ROS в космической технике. Однако эти результаты касаются, в первую очередь, систем управления тактического и стратегического уровня, которые не требуют работы в условиях жесткого реального времени и реализуются в виде программного обеспечения, абстрагированного от конкретного устройства управления при помощи операционной системы Linux. Создание же систем исполнительного уровня до сих пор развивается отдельно для каждого класса роботов. Причиной этого являются как определенные исторические предпосылки и консерватизм, свойственный, например, промышленной робототехнике, так и существенно более высокая зависимость исполнительных подсистем от применяемой элементной базы.

Первой проблемой при создании систем управления исполнительного уровня является широкий спектр применяемых интерфейсов для работы с первичными преобразо-

вателями датчиков и исполнительных устройств: I²C, SPI, UART, SSI, BISS, ШИМ, ЧИМ и др. При этом один проект может требовать 1 SPI и 3 UART интерфейса, а другой – не менее чем 5 независимых интерфейсов SPI. При использовании процессоров цифровой обработки сигналов (ЦОС) и микроконтроллеров, которые являются наиболее популярной основой для систем исполнительного уровня, набор периферии жестко зафиксирован, что привязывает разработчика к конкретным сериям и моделям микросхем.

Второй проблемой являются высокие требования к режиму реального времени на исполнительном уровне в сочетании с несколькими независимыми контурами управления и обработки сигналов, которые должны исполняться параллельно (например, расчет регуляторов и обработка наблюдателя синусно-косинусного датчика). Стандартным решением является использование операционных систем реального времени, но оно требует наличия избыточных вычислительных мощностей, поэтому многие разработчики создают, так называемые «*bare metal*» решения, вообще не предполагающие использования операционной системы. Такой подход делает крайне затратным не только переход на микроконтроллеры и процессоры ЦОС других серий, но часто затрудняет и переход между микросхемами одной серии.

Третья проблема связана с тем, что даже при использовании единой системы команд микроконтроллеры разных производителей имеют свои особенности работы, как вычислительного ядра, так и периферии (интерфейсов, таймеров, прерываний). В результате, даже при использовании функционально близких процессоров с одинаковой системой команд (например, STM STM32F103 и Миландр К1986BE92QI) запуск проекта, созданного для одной микросхемы, на другой требует частичной переработки программного кода.

В случае создания миниатюрных роботов, в которых все уровни системы управления вынужденно реализуются на базе одного вычислительного устройства, дополнительно встает одна из двух проблем: либо реализация алгоритмов интеллектуального управления на микроконтроллерах или процессорах ЦОС, либо реализация алгоритмов управления исполнительного уровня в режиме жесткого реального времени на встраиваемом компьютере под управлением ROS.

Существует два основных подхода к обеспечению конверсии решений между различными областями робототехники. Первый заключается в использовании единых интерфейсов связи между исполнительным и тактическим уровнем. Теоретически он позволяет обеспечить взаимозаменяемость модулей, сделанных для роботов разных классов. На практике же сервопривод, разработанный для космического робота, оказывается неоправданно дорог из-за своей сверхнадежности для сервисной робототехники, а привод сервисного робота недостаточно надежен для применения в условиях космоса. Второй подход состоит в том, чтобы при реализации программного кода весь специализированный функционал, учитывающий архитектурные особенности конкретного процессора, выделять в виде отдельных функций, которые будут заменены при переходе на другую модель и семейство микросхем. Однако это требует от разработчика глубокого понимания как используемой архитектуры, так и того, какие её части являются стандартизированными, а какие различаются от производителя к производителю. И даже при удачной реализации такого слоя абстракции от аппаратного обеспечения, разработчику все равно

приходится, для использования кода на каждом новом микроконтроллере или процессоре ЦОС, описывать функции работы с оборудованием заново, что выражается в существенных дополнительных трудозатратах.

За рубежом ведутся работы, посвященные унифицированным подходам к созданию аппаратно-программного обеспечения роботов, которые позволили бы обеспечить независимость от применяемой элементной базы и упростили конверсию технологий между роботами различных классов [63], однако уже сейчас понятно, что предлагаемые решения окажутся неподходящими для российских реалий. Так, в России в данный момент в военной и космической робототехнике практически обязательным условием является использование исключительно отечественных компонент. В то же время для коммерческих и промышленных роботов ключевой характеристикой является цена, по которой российская микроэлектроника на сегодня не может конкурировать с зарубежными аналогами. Это создает еще большее разделение с точки зрения технологических решений между роботами различных классов и, в том числе, затрудняет создание предприятиями оборонно-промышленного комплекса конкурентоспособной гражданской продукции, провозглашенное в качестве одной из целей Президентом Российской Федерации в своем Послании к Федеральному собранию в 2019 г. [64].

В связи с этим, следующими шагами по разработке общей методологии создания систем управления роботами различных классов должны стать:

1. Анализ взаимозаменяемой российской и зарубежной элементной базы.
2. Поиск возможных технических решений в области создания элементов систем управления и организации информационного обмена между ними, которые могли бы быть реализованы как на зарубежной, так и на отечественной элементной базе.
3. Создание на базе таких компонентов и решений концептуальной модели масштабируемой интеллектуальной системы управления с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе.

Литература:

1. Хрипунов С.В., Донченко А.А., Чиров Д.С., Винокурова Ю.С., Климов Р.С. и др. Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические Рекомендации. М: ГНИИ ЦР МО РФ, 2015. 34 с.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники, 4 изд. БХВ-Петербург, 2018. 304 с. ISBN 978-5-9775-3851-0
3. Zielinska T.T. History of Service Robots and New Trends. In: Novel Design and Applications of Robotics Technologies. IGI Global, 2019:158-187. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5276-5.ch006>
4. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. G. Bekey (Ed.). Assessment of international research and development in robotics. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006; P. 41-48. <http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf>
5. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2013;1(164):98-103.
6. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007;4:37-42.
7. Лохин В.М., Романов М.П., Трипольский П.Э. Повышение эффективности разработки роботов специального назначения на основе стандартизации и унификации аппаратных и программных средств интеллектуальных бортовых систем управления. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2014;1:99-105.
8. Furano G., Jansen R., Menicucci A. Review of radiation hard electronics activities at European Space Agency. *JINST*. 2013;8(02): C02007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02007>
9. Yin S., Xiao B., Ding S.X., Zhou D. et al. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system. *IEEE T. Ind. Electron.* 2016;63(5):3311-3320. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2530789>

10. Crestani D., Godary-Dejean K., Lapiere L. Enhancing fault tolerance of autonomous mobile robots. *Robot. Auton. Syst.* 2015;68:140-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>
11. Joshi S.D., Talange D.B. Fault Tolerant Control for a Fractional Order AUV System. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)* 2016;5(2):1-24. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2016040101>
12. Ашарина И.В. и др. Проблемы создания живучих сетцентрических систем управления группировками космических аппаратов. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии.* 2017;1:325-332.
13. Tadokoro S. (Ed.). Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue. Springer Science & Business Media, 2009. 192 p.
14. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Tadokoro S. et al. Redesign of rescue mobile robot Quince. In: 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. P. 13-18. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2011.6106794>
15. Nagatani K., Nagatani K., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *J. Field Robot.* 2013;30(1):44-63. <https://doi.org/10.1002/rob.21439>
16. Цариченко С.Г. Экстремальная робототехника в МЧС России – задачи и перспективы. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza.* 2012;28:97-105.
17. Цариченко С.Г., Савин М.В., Мозговой А.П., Николаева Е.Ю. Опыт 8-летней деятельности по созданию робототехники. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* 2013;1(4):146-150.
18. Kruijff G.-J.M., Pirri F., Gianni M., Papadakis P. et al. Rescue robots at earthquake-hit Mirandola, Italy: A field report. In: 2012 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). *IEEE.* 2012;1-8. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2012.6523866>
19. Манько С.В., Диане С.А.К., Лохин В.М., Новосельский А.К. Групповое управление роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли. *Экстремальная робототехника.* 2017;1(1):302-311.
20. Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г. Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота. *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* 2017;1(186):121-132. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2017-1-121132>
21. Yoshida K., Wilcox B., Hirzinger G., Lampariello R. Space robotics. In: Springer Handbook of Robotics. B. Siciliano, O. Khatib (Eds.). Springer, Cham, 2016. P. 1423-1462. https://hdl.handle.net/10.1007/978-3-319-32552-1_55
22. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton. Robot.* 2003;14(2-3):225-237. <https://doi.org/10.1023/A:1022287820808>
23. Полесский С.Н., Жаднов В.В., Артюхова М.А., Прохоров В.Ф. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании. *Компоненты и технологии.* 2010;9:93-98.
24. Ivchenko V., Krug P., Matyukhina T., Pavelyev S. Mars-500 Program Space-Based Mobile Robot “Turist”. *Appl. Mech. Mater.* 2015;789-790:742-746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.742>
25. Katz D.S., Some R.R. NASA advances robotic space exploration. *Computer.* 2003;36(1):52-61. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160056>
26. Ratter D. FPGAs on mars. *Xcell J.* 2004;50: 8-11.
27. Hirzinger G., Brunner B., Landzettel K. et al. Space robotics – DLR's telerobotic concepts, lightweight arms and articulated hands. *Auton. Robots.* 2003;14(2-3):127-145. <https://doi.org/10.1023/A:1022275518082>
28. Morris K. FPGAs in space. *FPGA and Programmable Logic J.* 2004;4(5).
29. Jörg S., Nickl V., Nothhelfer A., Bahls T. et al. The computing and communication architecture of the DLR hand arm system. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011. P. 1055-1062. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094860>
30. Lentaris G., Stamoulas I., Diamantopoulos D., Maragos K. et al. SPARTAN/SEXTANT/COMPASS: advancing space rover vision via reconfigurable platforms. In: Proc. Applied Reconfigurable Computing – 11th International Symposium. Springer, Cham, 2015. P. 475-486. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_44
31. Montealegre N., Merodio L., Fernández A., Armbruster P. et al. In-flight reconfigurable FPGA-based space systems. In: 2015 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). *IEEE.* 2015. P. 1-8. <https://doi.org/10.1109/AHS.2015.7231177>
32. Lentaris G., Stamoulas J., Soudris D., Lourakis M. et al. HW/SW codesign and FPGA acceleration of visual odometry algorithms for rover navigation on Mars. *IEEE T. Circ. Syst. Vid.* 2016;26(8):1563-1577. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2452781>
33. Jörg S., Tully J., Albu-Schäffer A. The hardware abstraction layer – supporting control design by tackling the complexity of humanoid robot hardware. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014. P. 6427-6433. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907808>
34. Gankidi P.R., Thangavelautham J. FPGA architecture for deep learning and its application to planetary robotics. In: Proc. 2017 IEEE Aerospace Conference. 2017. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943929>
35. Wirthlin M.J., Keller A.M., Draper J.T. et al. SEU mitigation and validation of the LEON3 soft processor using triple modular redundancy for space processing. In: Proc. 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. P. 205-214. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847278>
36. Notebaert O., Montano G., Planche T. et al. Towards SpaceWire-2: Space robotics needs: SpaceWire missions and applications, long paper. In: Proc. 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire). *IEEE,* 2016. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/SpaceWire.2016.7771614>

37. Badger J., Gooding D., Ensley K., Hambuchen K., Thackston A. ROS in space: A case study on robonaut 2. In: Robot Operating System (ROS), A. Koubaa (Ed.). Springer, Cham, 2016. P. 343-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_13
38. Розман Б.Я., Римский-Корсаков Н.А. Телеуправляемые подводные аппараты ИО РАН. IX Международная научно-техническая конференция. "Современные методы и средства океанологических исследований". Материалы конференции. М.: Изд-во РАН Института Океанологии. Часть 1, 2005 С. 46-56. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2829>
39. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Романов А.М. Универсальная бортовая система управления роботами различных типов базирования и назначения (реализация принципов унификации и импортозамещения). *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;1(3):230-248.
40. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов. *Подводные исследования и робототехника*. 2017;1(23):4-13.
41. Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Смольников А.В., Татаренко Е.И. Подводные глайдеры: вчера, сегодня, завтра. Часть 2. *Морской вестник*. 2013;2(46):98-101.
42. DeMarco K., West M.E., Collins T.R. An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV). In: OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. 2011. 7 p. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107001>
43. Smith R.N., Py F., Rajan K., Sukhatme G.S. Adaptive path planning for tracking ocean fronts with an autonomous underwater vehicle. In: Experimental Robotics, M.A. Hsieh, O. Khatib, V. Kumar (Eds.). Springer, 2016. P. 761-775. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7>
44. Lawrance N.R.J., Somers T., Jones D., Mccammon S. et al. Ocean deployment and testing of a semi-autonomous underwater vehicle. In: OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE, 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761276>
45. Sukvichai K., Wongsuwan K., Kaewnark N., Wisanuve P. Implementation of visual odometry estimation for underwater robot on ROS by using RaspberryPi 2. In: Proc. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). IEEE, 2016. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ELINFOCOM.2016.7563010>
46. Chalkiadakis V., Papandroulakis N., Livanos G., Moirgiorgou K. et al. Designing a small-sized autonomous underwater vehicle architecture for regular periodic fish-cage net inspection. In: Proc. 2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE, 2017. 6 p. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261525>
47. Centelles D., Soriano A., Marin R., Sanz P.J. Arquitectura para teleoperación inalámbrica con realimentación visual de ROVs basados en ArduSub. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0408>
48. ArduSub GitBook [Электронный ресурс]: режим доступа — свободный (дата обращения: 27.02.2019), URL: <https://www.ardusub.com/>
49. Antonelli G. Dynamic Control of 6-DOF AUVs and Fault Detection/Tolerance Strategies. In: Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, V. 123. Springer, Cham, 2018. P. 111-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0_3
50. Springer P.J. Military robots and drones: a reference handbook. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2013. 297 p. ISBN 9781-59884-732-1.
51. Рубцов И. В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2013;3(140):14-21.
52. Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2014;3(152):42-57.
53. Yamauchi B.M. PackBot: a versatile platform for military robotics. In: Proc. SPIE - International Society for Optics and Photonics, 2004. V. 5422. Unmanned ground vehicle technology VI. P. 228-238. <https://doi.org/10.1117/12.538328>
54. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Ивлев А.А., Юрин А.Д. Перспективы и реалии применения интеллектуальных технологий управления и обработки информации при создании образцов вооружения и военной техники нового поколения. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2009;3:16-23.
55. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Развитие технологии интеллектуального управления для создания перспективных образцов ВВТ на базе новых средств комплексной автоматизации проектирования. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2013;3(140):7-14.
56. Романов А.М., Слащев Б.В. Реализация Калмановской фильтрации на базе ПЛИС. Актуальные вопросы развития систем и средств военно-космической обороны. Сборник трудов V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 25-27 сентября 2014 г., под общ. ред. Н.Э. Ненартовича. М.: ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2014. С. 402-407.
57. Родионов В.В., Филиппов С.И., Варабин Д.А. Унифицированная система управления робототехническими комплексами. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2018;1(195):128-140.
58. Towler J., Bries M. ROS Military: Progress and Promise. In: Proc. 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), 2018. 10 p. URL: <https://events.esd.org/wp-content/uploads/2018/08/ROS-Military-Progress-and-Promise.pdf>

59. Ernst N. A., Kazman R., Bianco P. Towards rapid composition with confidence in robotics software. In: Proc. 1st International Workshop on Robotics Software Engineering. ACM, 2018. P. 44-47. <https://doi.org/10.1145/3196558.3196567>
60. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Оманов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Диане С.А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;2:22-32.
61. Корчак В.Ю., Лапшов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2015;10(171):83-95.
62. Павин А.М., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Реконфигурируемая распределенная система для группового управления АНПА. *Технические проблемы освоения Мирового океана*. 2017;7:263-269.
63. Mayoral V., Hernández A., Kojcev R., Muguruza I., Zam I. The shift in the robotics paradigm—The Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components. In: 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2017. P. 229-236. <https://doi.org/10.1109/AHS.2017.8046383>
64. Путин В.В. Послание Президента Федеральному Собранию, 2019 [Электронный ресурс]: режим доступа — свободный (дата обращения: 14.03.2019), URL: <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/copy/59863>

References:

1. Khripunov S. V., Donchenko A. A., Chirov D. S., Vinokurova Yu. S., Klimov R. S. et al. *Robototekhnicheskie sredstva, komplekсы i sistemy voennogo naznacheniya. Osnovnye polozeniya. Klassifikatsiya. Metodicheskie Rekomendatsii* (Robotic equipment, complexes and military systems. The main provisions. Classification. Guidelines). Moscow: GNII CR MO RF; 2015. 34 p. (in Russ.).
2. Yurevich E. I. *Osnovy robototekhniki* (Robotics Basics), 4th ed. BHV-Peterburg; 2018. 304 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9775-3851-0
3. Zielinska T. T. History of Service Robots and New Trends. In: Novel Design and Applications of Robotics Technologies. IGI Global, 2019:158-187. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5276-5.ch006>
4. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. G. Bekey (Ed.). Assessment of international research and development in robotics. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006; P. 41-48. <http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf>
5. Lopota A. V., Yurevich E. I. Stages and development prospects of robotic systems design modular principle. *Nauchno tekhnicheskie vedomosti Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2013;1(164):98-103 (in Russ.).
6. Lopota V. A., Yurevich E. I. Extreme robotics and mechatronics. Principles and perspectives of development. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2007;4:37-42 (in Russ.).
7. Lokhin V. M., Romanov M. P., Tripolsky P. E. Increase of efficiency of special robots development on the basis standardization and unification on intelligent control systems hardware and software. *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2014;1:99-105 (in Russ.).
8. Furano G., Jansen R., Menicucci A. Review of radiation hard electronics activities at European Space Agency. *JINST*. 2013;8(02): C02007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02007>
9. Yin S., Xiao B., Ding S. X., Zhou D. et al. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system. *IEEE T. Ind. Electron.* 2016;63(5):3311-3320. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2530789>
10. Crestani D., Godary-Dejean K., Lapiere L. Enhancing fault tolerance of autonomous mobile robots. *Robot. Auton. Syst.* 2015;68:140-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>
11. Joshi S. D., Talange D. B. Fault Tolerant Control for a Fractional Order AUV System. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)* 2016;5(2):1-24. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2016040101>
12. Asharina I. V. et al. Problems of creating robust network-centric control systems for spacecraft groupings. *Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii = Innovative, information and communication technologies*. 2017;1:325-332 (in Russ.).
13. Tadokoro S. (Ed.). Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue. Springer Science & Business Media; 2009. 192 p.
14. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Tadokoro S. et al. Redesign of rescue mobile robot Quince. In: 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. P. 13-18. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2011.6106794>
15. Nagatani K., Nagatani K., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *J. Field Robot.* 2013;30(1):44-63. <https://doi.org/10.1002/rob.21439>
16. Tsarichenko S. Extreme Robotics in the Russian Emergencies Ministry - Challenges and Prospects. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza = Safety & Fire Technique*. 2012;28:97-105 (in Russ.).

17. Tsarichenko S.G., Savin M.V., Mozgovoi A.P., Nikolaeva E.Yu. Experience of 8 years of activity in the creation of robotics. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy = Fire safety: problems and prospects*. 2013;1(4):97-105 (in Russ.).
18. Kruijff G.-J.M., Pirri F., Gianni M., Papadakis P. et al. Rescue robots at earthquake-hit Mirandola, Italy: A field report. In: 2012 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). *IEEE*. 2012;1-8. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2012.6523866>
19. Manko S.V., Diane S.A.K., Lokhin V.M., Novoselsky A.K. Group control of robots for debris removal and construction disassembly in the atomic industry. *Ekstremalnaya robototekhnika = Extreme Robotics*. 2017;1(1):302-311 (in Russ.).
20. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Combined computer vision system in firefighting robot control system. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2017;1(186):121-132 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2017-1-121132>
21. Yoshida K., Wilcox B., Hirzinger G., Lampariello R. Space robotics. In: Springer Handbook of Robotics. B. Siciliano, O. Khatib (Eds.). Springer, Cham, 2016. P. 1423-1462. https://hdl.handle.net/10.1007/978-3-319-32552-1_55
22. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton. Robot.* 2003;14(2-3):225-237. <https://doi.org/10.1023/A:1022287820808>
23. Polesskii S.N., Zhadnov V.V., Artyukhova M.A., Prokhorov V.F. Ensuring the radiation resistance of spacecraft equipment in the design. *Komponenty i tekhnologii = Components & technologies*. 2010;9:93-98 (in Russ.).
24. Ivchenko V., Krug P., Matyukhina T., Pavelyev S. Mars-500 Program Space-Based Mobile Robot "Turist". *Appl. Mech. Mater.* 2015;789-790:742-746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.742>
25. Katz D.S., Some R.R. NASA advances robotic space exploration. *Computer*. 2003;36(1):52-61. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160056>
26. Ratter D. FPGAs on mars. *Xcell J.* 2004;50:8-11.
27. Hirzinger G., Brunner B., Landzettel K. et al. Space robotics – DLR's telerobotic concepts, lightweight arms and articulated hands. *Auton. Robots*. 2003;14(2-3):127-145. <https://doi.org/10.1023/A:1022275518082>
28. Morris K. FPGAs in space. *FPGA and Programmable Logic J.* 2004;4(5).
29. Jörg S., Nickl V., Nothhelfer A., Bahls T. et al. The computing and communication architecture of the DLR hand arm system. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011. P. 1055-1062. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094860>
30. Lentar G., Stamoulias I., Diamantopoulos D., Maragos K. et al. SPARTAN/SEXTANT/COMPASS: advancing space rover vision via reconfigurable platforms. In: Proc. Applied Reconfigurable Computing – 11th International Symposium. Springer, Cham, 2015. P. 475-486. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_44
31. Montealegre N., Merodio L., Fernández A., Armbruster P. et al. In-flight reconfigurable FPGA-based space systems. In: 2015 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE. 2015. P. 1-8. <https://doi.org/10.1109/AHS.2015.7231177>
32. Lentar G., Stamoulias J., Soudris D., Lourakis M. et al. HW/SW codesign and FPGA acceleration of visual odometry algorithms for rover navigation on Mars. *IEEE T. Circ. Syst. Vid.* 2016;26(8):1563-1577. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2452781>
33. Jörg S., Tully J., Albu-Schäffer A. The hardware abstraction layer – supporting control design by tackling the complexity of humanoid robot hardware. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014. P. 6427-6433. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907808>
34. Gankidi P.R., Thangavelautham J. FPGA architecture for deep learning and its application to planetary robotics. In: Proc. 2017 IEEE Aerospace Conference. 2017. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943929>
35. Wirthlin M.J., Keller A.M., Draper J.T. et al. SEU mitigation and validation of the LEON3 soft processor using triple modular redundancy for space processing. In: Proc. 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. P. 205-214. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847278>
36. Notebaert O., Montano G., Planche T. et al. Towards SpaceWire-2: Space robotics needs: SpaceWire missions and applications, long paper. In: Proc. 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire). IEEE, 2016. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/SpaceWire.2016.7771614>
37. Badger J., Gooding D., Ensley K., Hambuchen K., Thackston A. ROS in space: A case study on robonaut 2. In: Robot Operating System (ROS), A. Koubaa (Ed.). Springer, Cham, 2016. P. 343-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_13
38. Rozman B.Ya., Rimskii-Korsakov N.A. Remote control underwater vehicles IO RAS. In: Proc. IX International Scientific and Technical Conference. "Modern methods and means of oceanological research." Moscow: RAS Institute of Oceanology Publishing house; 2005. P. 46-56 (in Russ.). URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2829>
39. Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Romanov A.M. The universal on-board control system for robots of various type of development and purpose (implementation of the principles of unification and import substitution). *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2015;1(3):230-248 (in Russ.).
40. Vaulin Yu.V., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Pavin A.M. The configurable navigation and control system for multifunction underwater robots. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*. 2017;1(23):4-13 (in Russ.).
41. Kozhemyakin I.V., Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Smolnikov A.V., Tatarenko E.I. Underwater Gliders: yesterday, today, tomorrow. Part 2. *Morskoi vestnik*. 2013;2(46):98-101 (in Russ.).

42. DeMarco K., West M.E., Collins T.R. An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV). In: Proc. OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. 2011. 7 p. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107001>
43. Smith R.N., Py F., Rajan K., Sukhatme G.S. Adaptive path planning for tracking ocean fronts with an autonomous underwater vehicle. In: Experimental Robotics, M.A. Hsieh, O. Khatib, V. Kumar (Eds.). Springer; 2016. P. 761-775. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7>
44. Lawrance N.R.J., Somers T., Jones D., Mccammon S. et al. Ocean deployment and testing of a semi-autonomous underwater vehicle. In: Proc. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE; 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761276>
45. Sukvichai K., Wongsuwan K., Kaewnark N., Wisanuve P. Implementation of visual odometry estimation for underwater robot on ROS by using RaspberryPi 2. In: Proc. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). IEEE; 2016. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ELINFOCOM.2016.7563010>
46. Chalkiadakis V., Papandroulakis N., Livanos G., Moirogiorgou K. et al. Designing a small-sized autonomous underwater vehicle architecture for regular periodic fish-cage net inspection. In: Proc. 2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE; 2017. 6 p. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261525>
47. Centelles D., Soriano A., Marin R., Sanz P.J. Arquitectura para teleoperación inalámbrica con realimentación visual de ROVs basados en ArduSub. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0408>
48. ArduSub GitBook [Electronic resource], URL:<https://www.ardusub.com/>
49. Antonelli G. Dynamic Control of 6-DOF AUVs and Fault Detection/Tolerance Strategies. In: Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, V. 123. Springer, Cham, 2018. P. 111-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0_3
50. Springer P.J. Military robots and drones: a reference handbook. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2013. 297 p. ISBN 9781-59884-732-1.
51. Rubtsov I.V. Current situation and perspective of development for ground military and special robotics. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2013;3(140):14-21 (in Russ.).
52. Kudryashov V.B., Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubcov I.V. Problems of robotization for military ground technics. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2014;3(152):42-57 (in Russ.).
53. Yamauchi B.M. PackBot: a versatile platform for military robotics. In: Proc. SPIE - International Society for Optics and Photonics, 2004. V. 5422. Unmanned ground vehicle technology VI. P. 228-238. <https://doi.org/10.1117/12.538328>
54. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manjko S.V., Romanov M.P., Ivlev A.A., Yurin A.D. Perspectives and Realities of Used Intellectual Technologies of Control and Information Processing for Creation of Equipment Models and War Technics of Modern Generation. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie = Mechatronics, automation, control.* 2009;3:16-23 (in Russ.).
55. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Aleksandrova R.I. Development of intelligent control technology for creation of autonomous objects on the basis of complex automation design. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2013;3(140):7-14 (in Russ.).
56. Romanov A.M., Slaschov B.V. FPGA-based implementation of Kalman filtering. In: Proc. Vth Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists "Actual issues of the development of systems and means of military space defense". Moscow, September 25-27, 2014. P. 402-407 (in Russ.).
57. Rodionov V.V., Filippov S.I., Varabin D.A. Unified robotics control system. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2018;1(195):128-140 (in Russ.).
58. Towler J., Bries M. ROS Military: Progress and Promise. In: Proc. 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), 2018. 10 p. URL: <https://events.esd.org/wp-content/uploads/2018/08/ROS-Military-Progress-and-Promise.pdf>
59. Ernst N. A., Kazman R., Bianco P. Towards rapid composition with confidence in robotics software. In: Proc. 1st International Workshop on Robotics Software Engineering. ACM, 2018. P. 44-47. <https://doi.org/10.1145/3196558.3196567>
60. Makarov I.M., Lohin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Kryuchonkov E.N., Kucherskiy R.V., Diane S.A. Multi-agent robotic systems: Application Examples and Prospects. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie = Mechatronics, automation, control.* 2012;2: 22-32 (in Russ.).
61. Korchak V.Yu., Lapshov V.S., Rubtsov I.V. Perspective of development for military and special ground robots. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2015.;10(171):83-95 (in Russ.).
62. Pavin A.M., Inzartsev A.V., Eliseenko G.D. A reconfigurable distributed system for Autonomous Unmanned Underwater Vehicle group management. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana = Technical problems of the development of the oceans.* 2017;7:263-269 (in Russ.).

63. Mayoral V., Hernández A., Kojcev R., Muguruza I., Zam I. The shift in the robotics paradigm—The Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components. In: 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2017. P. 229-236. <https://doi.org/10.1109/AHS.2017.8046383>

64. Putin V.V. Message of the President to the Federal Assembly, 2019 [Electronic resource]: URL: <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/copy/59863> (in Russ.).

Об авторе:

Романов Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры биокбернетических систем и технологий Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

About the author:

Alexey M. Romanov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Chair of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Моделирование фазового метода подавления зеркального канала приема

Р.Р. Вишняков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: rustamvishnyakov0955@gmail.com

В работе была показана алгоритмическая возможность подавления зеркального канала приема фазовым методом, приведены основные выходные параметры схем, реализующих данный метод, приведена математическая модель, позволяющая оценить избирательность как функцию от дисбаланса фаз и амплитуд плечей схемы, проведено математическое и системотехническое моделирование. Результаты различных способов моделирования совпадают, что свидетельствует о верности математической модели и подтверждает техническую возможность реализации фазового метода подавления зеркального канала. На основе данной модели возможно обеспечение высокого уровня подавления (не менее 40 дБ) зеркального канала путем амплитудной и фазовой компенсации квадратурных плечей схемы. Приведена зависимость уровня шумов на выходе схемы фазового подавления зеркального канала как функции от частотных характеристик ее элементов. Результаты настоящей работы могут быть использованы при дальнейшей практической реализации представленного метода на этапе выбора элементов на основе анализа их характеристик. По приведенным математическим моделям и характеристикам выбранных элементов, для практической реализации схемы, можно оценить уровень подавления зеркального канала, уровень шумов на выходе схемы фазового подавления зеркального канала и отношение сигнал-помеха. На практическом примере реализации рассматриваемого метода показано влияние широкополосности фазовращателей на уровень шумов. Показано, что обеспечение высокого уровня избирательности с целью минимизации уровня шумов зеркального канала целесообразно только до некоторых значений (около 25 дБ). Дальнейшее улучшение избирательности, например, минимизацией фазового и амплитудного балансов, или взаимная компенсация дисбалансов плечей смесителя и фазовращателя необходима при наличии требований к увеличению отношения сигнал-помеха. Показано, что при амплитудном дисбалансе схемы до 1 дБ и фазовом дисбалансе до 5 град. в требуемой частотной полосе, возможно обеспечение избирательности до 25 дБ и снижение уровня шумов на 2.5–3 дБ.

Ключевые слова: зеркальный канал приема, фазовый метод подавления зеркального канала, супергетеродинный приемник, математическая модель, фаза сигнала, гармонические составляющие.

Для цитирования: Вишняков Р.Р. Моделирование фазового метода подавления зеркального канала приема. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):33-47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-33-47>

Simulation of the image rejection phase method

Rustam R. Vishnyakov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: rustamvishnyakov0955@gmail.com

The paper considers the algorithmic possibility of the image rejection method. The main resulting characteristics of circuits implementing the above method are presented. The simulation model allows estimating the selectivity coefficient as a function of the phase and amplitude imbalance of the circuit branches. Mathematical and circuit simulations were conducted. The results of different modeling methods coincide, and the simulation results verify the possibility of implementing the image rejection method. On the basis of this model it is possible to provide a high level (at least 40 dB) of image rejection by amplitude and phase circuit imbalance compensation. The dependence of the noise level at the output of the image rejection circuit as a function of the circuit elements frequency characteristics is given. The results of this work could be used for further practical implementation of above mentioned method at the stage of selecting elements based on an analysis of their characteristics. The simulation model could be used to select required radioelements and to estimate image rejection level. It is possible to estimate the level of image channel suppression, the noise level and the signal-to-noise ratio at the output of the image rejection circuit by using the above mentioned mathematical models and characteristics of the selected elements for practical implementation of the circuit. The effect of the broadband phase shifters on the noise level is considered with the implementation of the above method as an example. It was shown that ensuring a high level of selectivity in order to minimize the noise level of the image channel is advisable only up to some values (about 25 dB). Further improvement of selectivity, for example, by minimizing the phase and amplitude balances, or mutual compensation of the mixer and phase shifter branch imbalances are necessary, if there are requirements for increasing the signal-to-noise ratio. It is shown that it is possible to ensure selectivity of up to 25 dB and a noise level reduction of 2.5–3 dB if the amplitude imbalance of the circuit is up to 1 dB, and the phase imbalance is up to 5 deg. in the required frequency band.

Keywords: image channel, phase method of image rejection, super heterodyne, simulation model, signal phase, harmonic component.

For citation: Vishnyakov R.R. Simulation of the image rejection phase method. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):33-47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-33-47>

С развитием радиотехнических систем более жесткие требования предъявляются к их основным параметрам: ширине динамического диапазона, рабочей полосе частот, полосе пропускания [1]. Кроме того, существует тенденция перехода к более высокой частоте несущего колебания. В тоже время для цифровой обработки сигналов промежуточная частота супергетеродинного приемника должна быть как можно ниже для оцифровывания сигнала с большим количеством отсчетов. Таким образом, появляется необходимость фильтрации зеркального канала приема в супергетеродинном приемнике с высокой несущей частотой и частотой гетеродина с малой отстройкой от несущего колебания, соответствующей низкой промежуточной частоте. Обеспечить подавление зеркального канала приема только СВЧ-фильтрами в этом случае становится сложно. При этом, если не выполняется условие (1), которое наглядно иллюстрируется рис. 1, возникает проблема фильтрации зеркального канала, находящегося в рабочей полосе всей радиотехнической системы. Таковой, например, может являться радиолокационная система, для которой полезный сигнал при различных условиях работы может находиться на любом участке спектра $\Delta f_{\text{сист.}}$, ограниченного частотами $f_{\text{с}}$ и $f_{\text{н}}$ (рис. 1)

$$f_{\text{нч}} \geq \frac{1}{2}(f_{\text{с}} - f_{\text{н}} + \Delta f_{\text{нч}}), \quad (1)$$

где $f_{\text{нч}}$ – промежуточная частота приема; $f_{\text{с}}$ – верхняя граница диапазона частот работы системы; $f_{\text{н}}$ – нижняя граница диапазона частот работы системы; $\Delta f_{\text{нч}}$ – требуемая рабочая полоса частот.

В этом случае, чтобы осуществить фильтрацию зеркального канала в супергетеродинном приемнике, необходим перестраиваемый в широкой полосе узкополосный режекторный преселектор с добротностью несколько сотен, с коэффициентом прямоугольности близким к 1. Разработка и настройка такого устройства сложна.

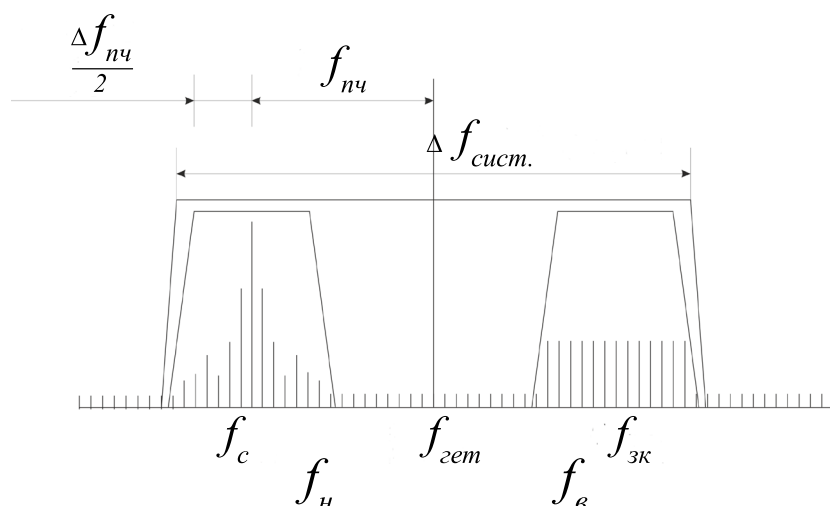


Рис. 1. Спектральное представление сигнала на входе приемного устройства.

Одним из способов подавления зеркального канала приема является фазовый метод [1–3]. Структурная схема реализации такого метода представлена на рис. 2. Расчеты для оценки избирательности по зеркальному каналу будут проведены на основе математической и системотехнической моделей.

Известно, что для преобразования сигнала в смесителе, реализованном на диодах, используется квадратичный участок ВАХ диодов, при этом справедливо соотношение:

$$I = a \cdot U^2, \quad (2)$$

где I – ток нелинейного элемента; U – напряжение на нелинейном элементе; a – коэффициент пропорциональности.

Введя в выражение (2) сумму гармонических колебаний, представляющих собой сигнал радиочастоты и сигнал гетеродина, получим:

$$I = a \cdot (A \cdot \cos(\omega_c \cdot t) + B \cdot \cos(\omega_{zem} \cdot t))^2, \quad (3)$$

где A – амплитуда сигнала; B – амплитуда сигнала гетеродина; ω_c – круговая частота сигнала; ω_{zem} – круговая частота гетеродина.

После преобразования:

$$I = a \cdot \left(\frac{1}{2}(A^2 + B^2) + \frac{A^2}{2} \cos(2 \cdot \omega_c \cdot t) + \frac{B^2}{2} \cos(2 \cdot \omega_{zem} \cdot t) + A \cdot B \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \omega_{zem} \cdot t) + A \cdot B \cdot \cos(\omega_c \cdot t + \omega_{zem} \cdot t) \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что в спектре выходного сигнала помимо сигнала с разностной частотой будут присутствовать постоянная составляющая, вторые гармоники входного сигнала и сигнала гетеродина, и сигнал с суммарной частотой. Данные сигналы в реальных смесителях имеют уровень порядка минус 50 дБ или меньше, поэтому в дальнейшем гармонические составляющие при оценке возможностей фазового подавления зеркального канала учитываться не будут [4]. С учетом этого, выражение (4) можно привести к виду:

$$I = k \cdot \cos(\omega_{zem} \cdot t - \omega_c \cdot t), \quad (5)$$

где k – коэффициент трансформации амплитуды сигнала при преобразовании частоты.

Если выражение (5) переписать с учетом структурной схемы, представленной на рис. 2, получим в точках 1 и 2:

$$I_1 = k \cdot \cos(\omega_{zem} \cdot t - \omega_c \cdot t - \varphi_{zem}), \quad (6)$$

$$I_2 = k \cdot \cos(\omega_{zem} \cdot t - \omega_c \cdot t). \quad (7)$$

где φ_{zem} – фазовый набег сигнала гетеродина в цепи гетеродина.

Окончательное выражение сигнала после квадратурного преобразования (точка 5 на рис. 2) с учетом дисбаланса коэффициентов передачи плечей (b) преобразователя без учета коэффициента трансформации амплитуд сигнала при преобразовании частоты (k) примет вид:

$$I_5 = b \cdot \cos(-\omega_c \cdot t - (-\omega_{zem} \cdot t + \varphi_{zem}) - \varphi_1) + (1 - b) \cdot \cos(\omega_{zem} \cdot t - \omega_c \cdot t), \quad (8)$$

где φ_1 – фазовый набег сигнала в плече 1.

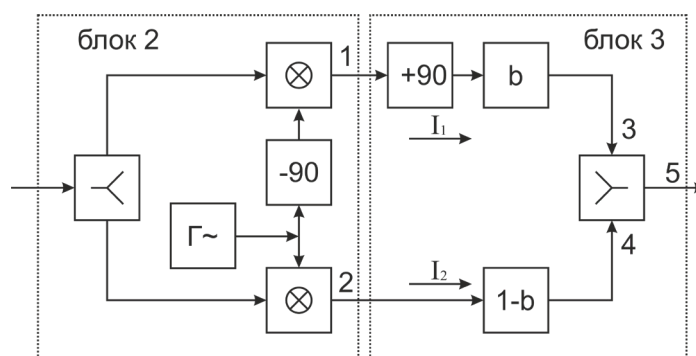


Рис. 2. Структурная схема подавления зеркального канала приема.

Из выражения (8) видно, что для обеспечения подавления зеркального канала необходимо не строгое выполнение поворота фазы на 90 градусов в фазовращателях, а суммарное изменение фазы на 180 градусов [5]. При этом следует учесть, что в случае приема зеркального канала в аргументе первого слагаемого выражения (8) необходимо поменять знак перед выражением полной фазы сигнала гетеродина и полной фазы сигнала. Связано это с тем, что четность функции косинуса не позволит учесть знак преобразования, в то время как колебание с отрицательной частотой физически не существует.

Избирательность по зеркальному каналу можно определить, как отношение амплитуд сигналов с частотами основного и зеркального каналов приема:

$$R = \frac{I_{\text{снр}}}{I_{\text{зк}}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{снр}}$ – амплитуда сигнала основного канала приема на выходе преобразователя частоты (в точке 5, рис. 2); $I_{\text{зк}}$ – амплитуда сигнала зеркального канала приема на выходе преобразователя частоты (в точке 5, рис. 2).

Для оценки зависимости избирательности по зеркальному каналу приема фазовым методом в программе MATLAB были проведены расчеты избирательности как функции от дисбаланса плечей преобразователя в соответствии с (9). Здесь величины избирательности и дисбаланс плечей приведены в децибелах. Амплитудный дисбаланс b из безразмерных величин пересчитан в децибелы следующим образом:

$$b[\text{дБ}] = 10 \cdot \log\left(\frac{b}{1-b}\right). \quad (10)$$

Суммарное изменение фазы сигнала пересчитано в дисбаланс ψ следующим образом:

$$\psi = \varphi - 180, \quad (11)$$

где φ – суммарное изменение фазы определяется выражением:

$$\varphi = \varphi_{\text{снр}} - \varphi_1. \quad (12)$$

На рис. 3 представлены сечения двумерной функции $R = f(\psi, b)$ при $\psi = 0^\circ$, $b = 0$ дБ.

Также для подтверждения корректности расчетов в программе AWRDE была построена модель (рис. 4) структурной схемы, представленной на рис. 2.

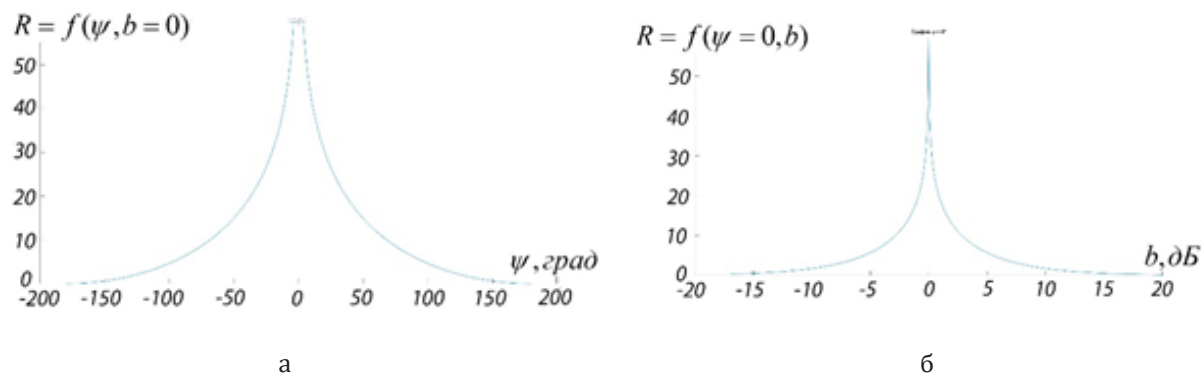


Рис. 3. Сечения двумерной функции $R = f(\psi, b)$ при $\psi = 0^\circ$, $b = 0$ дБ.
а) зависимость избирательности от фазового дисбаланса;
б) зависимость избирательности от дисбаланса плечей.

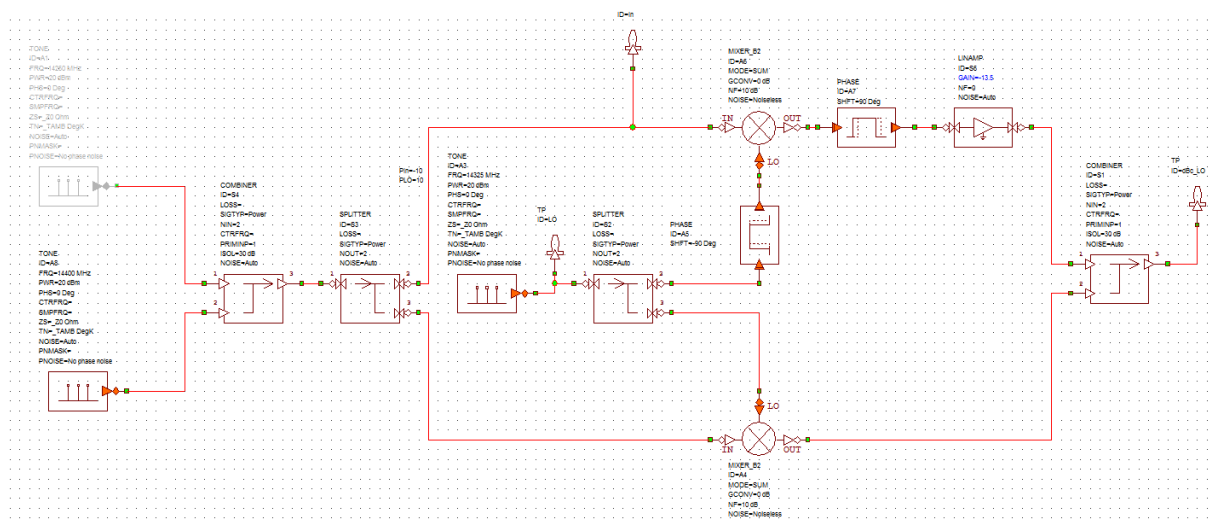


Рис. 4. Структурная схема модели в программе AWRDE.

Для построения графиков зависимости избирательности по зеркальному каналу от фазового и амплитудного дисбалансов плечей преобразователя было проведено моделирование. На рис. 5 представлены результаты расчета спектра сигнала, по которым получена требуемая зависимость.

Результаты моделирования объединены с результатами расчетов в программе MATLAB (рис. 6).

Для наглядности результаты, полученные различным путем, объединены на одном графике. Совпадение результатов расчета и моделирования с достаточной точностью свидетельствует о том, что выражения (8) и (9) корректно описывают избирательность схемы фазового подавления как функцию дисбалансов плечей. Чтобы учесть одновременно дисбаланс амплитуд и фаз плечей, удобнее построить изолинии двумерного графика избирательности. На рис. 7 представлены сечения коэффициента избирательности при разных соотношениях амплитудного и фазового дисбаланса.

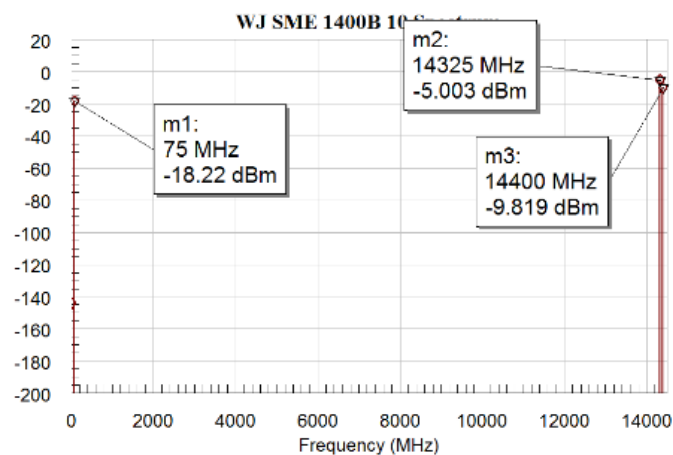


Рис. 5. Результаты моделирования преобразования сигнала в программе AWRDE.

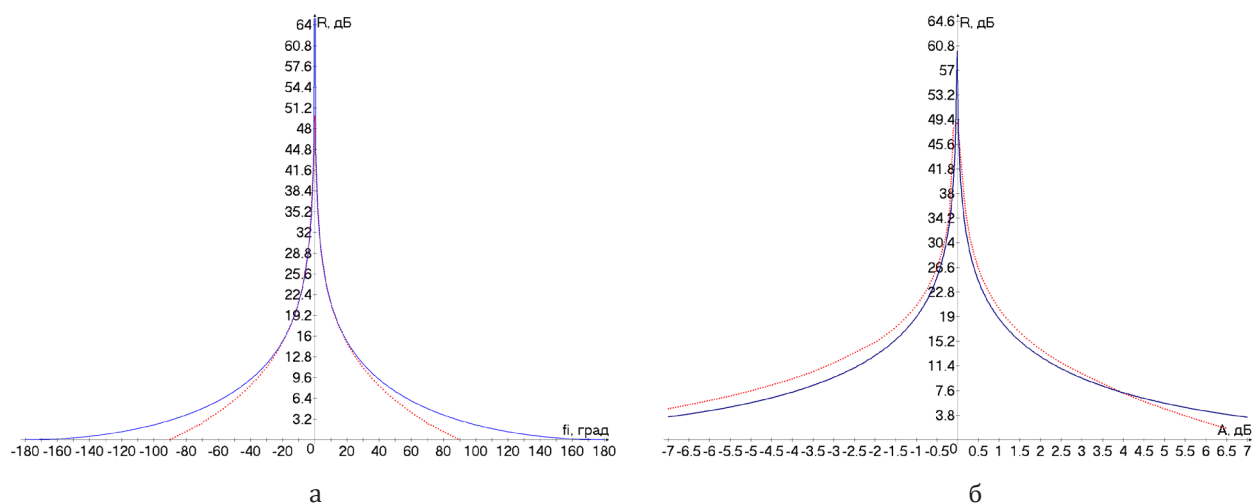


Рис. 6. Результаты расчетов в MATLAB и моделирования (синяя линия – расчеты в программе MATLAB, красная линия – результаты моделирования в программе AWRDE):

- а) зависимость избирательности от фазового дисбаланса;
б) зависимость избирательности от амплитудного дисбаланса.



Рис. 7. Зависимость избирательности по зеркальному каналу при различных соотношениях фазового и амплитудного дисбаланса.

Из рис. 7 видно, что при наличии фазового дисбаланса избирательность будет также ограничиваться и амплитудным дисбалансом. При этом дисбаланс амплитуд не столь значителен по сравнению с фазовым. При отклонении фазы от требуемой величины всего на 3–4 градуса ухудшение избирательности составит порядка 3–4 дБ, в то время как дисбаланс плечей может достигать 0.5–1 дБ с ухудшением избирательности всего на 1–2 дБ. В то же время обеспечить фазовую идентичность гораздо сложнее, чем идентичность коэффициентов передачи [6, 7].

Селекция зеркального канала приема обеспечивает не только улучшение отношения сигнал-помеха, при наличии помеховых спектральных составляющих на частотах зеркального канала, но и уменьшение уровня шумов на промежуточной частоте за счет гетеродинного переноса шумов с зеркального канала. Для оценки влияния уровня подавления зеркального канала на уровень тепловых шумов рассмотрим схему, представленную на рис. 8, которая является упрощением схемы, представленной на рис. 2.

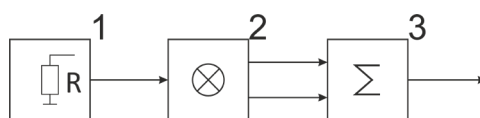


Рис. 8. Структурная схема расчета шумов.

Блок 1 структурной схемы (рис. 8) представляет собой источник тепловых шумов с мощностью, определяемой выражением:

$$P_{т.ш.}(f) = k \cdot T \cdot \Delta f \quad (13)$$

где $P_{т.ш.}$ – мощность шумов; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; Δf – полоса частот.

Блок 2 обобщает собой делитель сигнала и два плеча со смесителями. Данный блок можно охарактеризовать коэффициентом передачи $G_{см}$ и коэффициентом шума $K_{ш.см.}$. Блок 3 представляет собой фазовращатель и сумматор с коэффициентом передачи $G_{фв}$ и коэффициентом шума $K_{ш.фв.}$. Поскольку мощность сигнала на входе такой схемы делится в делителе, а затем складывается в сумматоре, коэффициент, учитывающий деление и суммирование мощностей, опустим и будем учитывать только потери преобразования и передачи сигнала. Мощность шумов на выходе схемы $P_{ш.вых.}$ (рис. 8) можно определить следующим образом:

$$P_{ш.вых.}(f) = P_{т.ш.}(f) \cdot G_{см}(f) \cdot G_{фв}(f_{гет} - f) + (K_{ш.см.}(f) - 1) \cdot P_{т.ш.}(f) \cdot G_{см}(f) \cdot G_{фв}(f_{гет} - f) + (K_{ш.фв.}(f_{гет} - f) - 1) \cdot P_{т.ш.}(f) \cdot G_{фв}(f_{гет} - f) \quad (14)$$

где $f_{гет}$ – частота гетеродина.

Преобразовав (14) с учетом (13), получим:

$$P_{ш.вых.}(f) = k \cdot T \cdot \Delta f \cdot G_{см}(f) \cdot G_{фв}(f_{гет} - f) \cdot (K_{ш.см.}(f) + \frac{K_{ш.фв.}(f_{гет} - f) - 1}{G_{см}(f)}). \quad (15)$$

Интегрируя выражение (14) по всем частотам, можно получить мощность шумов на выходе схемы, однако, поскольку шумовая полоса ограничивается полосовым фильтром на промежуточной частоте, интегрирование можно ограничить двумя полосами – полосой фильтра промежуточной частоты по основному каналу приема от f_2 до f_1 и равной полосой по зеркальному каналу приема от $f_{2\text{зк}}$ до $f_{1\text{зк}}$ (рис. 9). С учетом этого, выражение (15) преобразуется:

$$P_{\text{ш.вых.}} = k \cdot T \cdot \left(\int_{f_1}^{f_2} G_{\text{см.}}(f) \cdot G_{\text{фв.}}(f_{\text{зет}} - f) \cdot \left(K_{\text{ш.см.}}(f) + \frac{K_{\text{ш.фв.}}(f_{\text{зет}} - f) - 1}{G_{\text{см.}}(f)} \right) df + \right. \\ \left. + \int_{f_{1\text{зк}}}^{f_{2\text{зк}}} G_{\text{см.}}(f) \cdot G_{\text{фв.}}(f_{\text{зет}} - f) \cdot \left(K_{\text{ш.см.}}(f) + \frac{K_{\text{ш.фв.}}(f_{\text{зет}} - f) - 1}{G_{\text{см.}}(f)} \right) df \right), \quad (16)$$

где f_2 – верхняя граница полосы частот основного канала приема; f_1 – нижняя граница полосы частот основного канала приема; $f_{2\text{зк}}$ – верхняя граница полосы частот зеркального канала приема; $f_{1\text{зк}}$ – нижняя граница полосы частот зеркального канала приема.

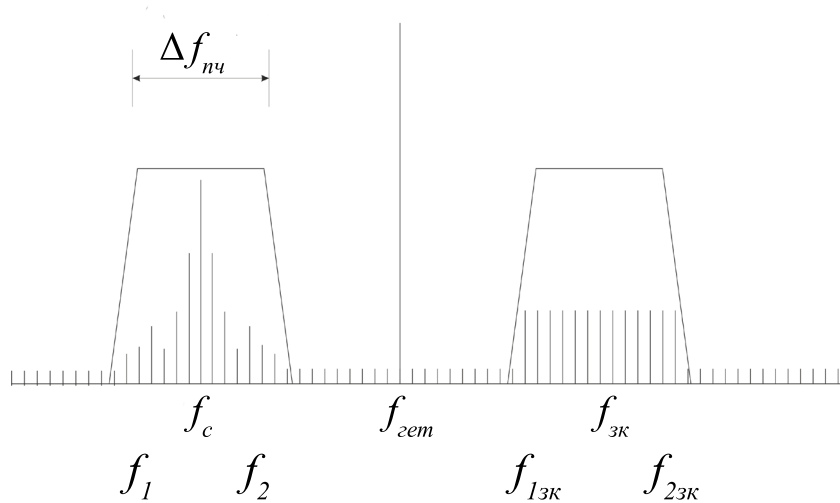


Рис. 9. Схематичное представление пределов интегрирования спектра сигнала.

Произведение коэффициентов передачи в подынтегральной функции второго интеграла в выражении (16) на частотах зеркального канала представляет собой избирательность по зеркальному каналу приема и может быть заменена ранее полученной функцией:

$$G_{\text{см.}}(f) \cdot G_{\text{фв.}}(f_{\text{зет}} - f) = R(\psi(f), b(f)), \quad (17)$$

где $\psi(f)$ – суммарный дисбаланс фаз блока 2 и блока 3 (рис. 8); $b(f)$ – суммарный дисбаланс плечей блока 2 и блока 3 (рис. 8).

$$\psi(f) = \psi_{\text{см.}}(f) + \psi_{\text{фв.}}(f_{\text{зет}} - f), \quad (18)$$

где $\psi_{\text{см.}}(f)$ – баланс фаз смесителя; $\psi_{\text{фв.}}(f)$ – баланс фаз фазовращателя.

$$b(f) = b_{см.}(f) + b_{фс.}(f_{сет} - f), \quad (19)$$

где $b_{см.}(f)$ – баланс амплитуд смесителя; $b_{фс.}(f)$ – баланс амплитуд фазовращателя.

Для оценки избирательности, которую можно получить при реализации описанного метода селекции зеркального канала, а также величины уменьшения уровня шумов в полосе промежуточной частоты, приведем обзор способов построения, выбора и расчета характеристик схемы [8].

В качестве первой половины структурной схемы (блок 2, рис. 2), включающей в себя делитель мощности, два смесителя и фазовращатель, целесообразно использовать одну микросхему, объединяющую в себе эти элементы. В качестве такой микросхемы можно применить НМС8191 или ее аналоги [9]. Данная микросхема представляет собой смеситель с двумя квадратурными выходами с высоким уровнем фазового и амплитудного баланса плечей (рис. 10). Также существуют смесители, объединенные с малошумящим усилителем (МШУ) с целью миниатюризации радиотехнического устройства, например, НМС1113.

Реализация фазовращателя на 90° и сумматора (блок 3, рис. 2), устанавливаемого на одно из выходных плечей смесителя, может быть различной и сильно варьируется от промежуточной частоты и требуемой рабочей полосы частот [4]:

- В качестве фазовращателя можно использовать два звена RC-цепочки.

Недостатком такой цепи является большая неравномерность и низкое значение коэффициента передачи, поскольку сдвиг фаз между плечами 90° обеспечивается при коэффициенте передачи по мощности -3 дБ.

- В качестве фазовращателя возможно применение гибридного ответвителя или моста Ланге.

Существенным преимуществом такого вида фазовращателей является относительная простота регулировки фазового сдвига. Кроме того, возможна регулировка фазы сигнала аналоговым способом с помощью изменения напряжения на варикапах. Однако применение описанных фазовращателей ограничено требуемыми рабочими частотами. Поскольку на длине отрезков линий передач должна укладываться четверть длины волны, то использование вышеупомянутых типов фазовращателей возможно в случае, если промежуточная частота находится в диапазоне высоких частот. В супергетеродинном приемнике такая ситуация возможна при многократном переносе частоты.

- Низкочастотным вариантом вышеописанных типов фазовращателей является гибридный ответвитель на сосредоточенных элементах.

К недостаткам такой цепи следует отнести сложность настройки и физической реализации ввиду наличия разброса номинального значения элементов и наличия паразитных индуктивностей и емкостей.

- К более широкополосным фазовращателями с наименьшими потерями можно отнести цепи, представленные на рис. 11.

Чем выше порядок представленных цепей, тем шире рабочий диапазон частот, в котором выполняется равенство амплитуд на выходе плечей фазовращателя и баланс фаз. Однако повышение порядка цепи ведет к усложнению настройки цепи под нужный частотный диапазон вследствие неидеального поведения элементов.

- Следующим альтернативным вариантом является фазовращатель на трансформаторе [10].

Схема фазовращателя представляет собой трансформатор, между плечами которого

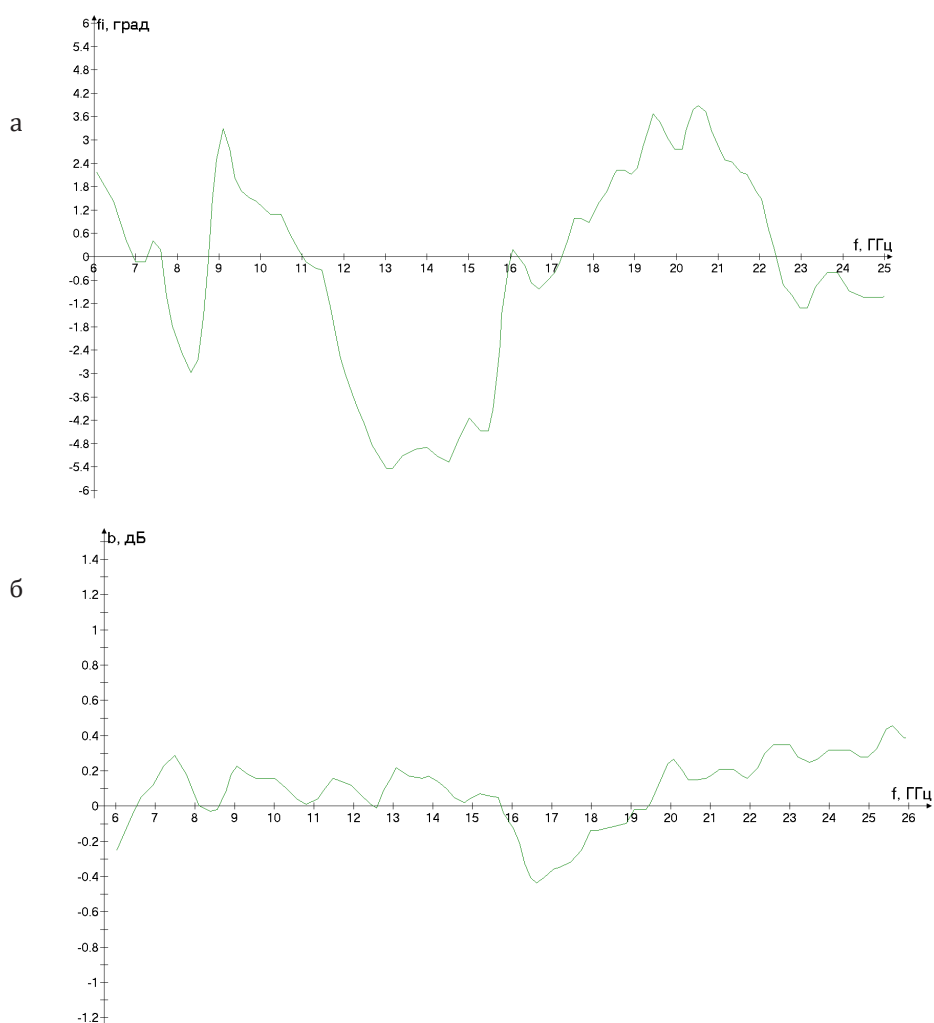


Рис. 10. Характеристики смесителя НМС8191: а) баланс фаз плечей б) баланс амплитуд плечей.

включены конденсаторы. Данная схема обеспечивает высокий коэффициент передачи, поскольку вклад в омические потери создают только паразитные эффекты, в большей степени в трансформаторе. Кроме того, схема с трансформатором обеспечивает баланс фаз в широком диапазоне частот.

- Простым с точки зрения проектирования цепи может считаться решение использовать в качестве фазовращателя готовый элемент, например, такой как фазовращатель PS-927 или аналоги.

Осуществлять монтаж и настройку готового элемента гораздо проще, чем осуществлять монтаж нескольких элементов. Однако так же, как и в случае применения гибридного ответвителя или моста Ланге, применение готовой схемы ограничено требуемым диапазоном частот. Данные микросхемы в диапазоне до нескольких сотен мегагерц имеют большие габариты. Кроме того, большинство фазовращателей для поддержания необходимого фазового сдвига требуют некоторого постоянного уровня напряжения управления и тока, что с учетом повышенных габаритов негативно сказывается на характеристиках приемного тракта в целом.

Выше были приведены лишь основные варианты реализации фазовращателя. В сообщениях [11–15] также представлены альтернативные схемы.

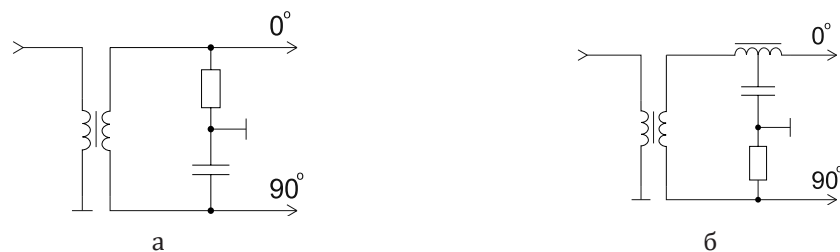


Рис. 11. Схемы фазовращателей:

а) фазовращатель первого порядка; б) фазовращатель второго порядка.

На рис. 12 представлены характеристики вышеописанных фазовращателей.

Наиболее простым решением, обеспечивающим приемлемый баланс амплитуд и фаз, можно считать фазовращатель с использованием трансформатора. Так, например, на рынке представлены трансформаторы ЕТС1-1-13 или ТС1-1 и их аналоги. Приведем расчет избирательности и уровня шумов для схемы, состоящей из микросхемы НМС8191 в качестве блока 2 (рис. 8), каждого вида рассмотренных фазовращателей в качестве блока 3 (рис. 8) для следующих условий: $T = 290$ К; $f_{\text{сет.}} = 14250$ МГц; $f_2 = 14225$ МГц; $f_1 = 14125$ МГц; $f_{2\text{зк}} = 14375$ МГц; $f_{1\text{зк}} = 14275$ МГц;

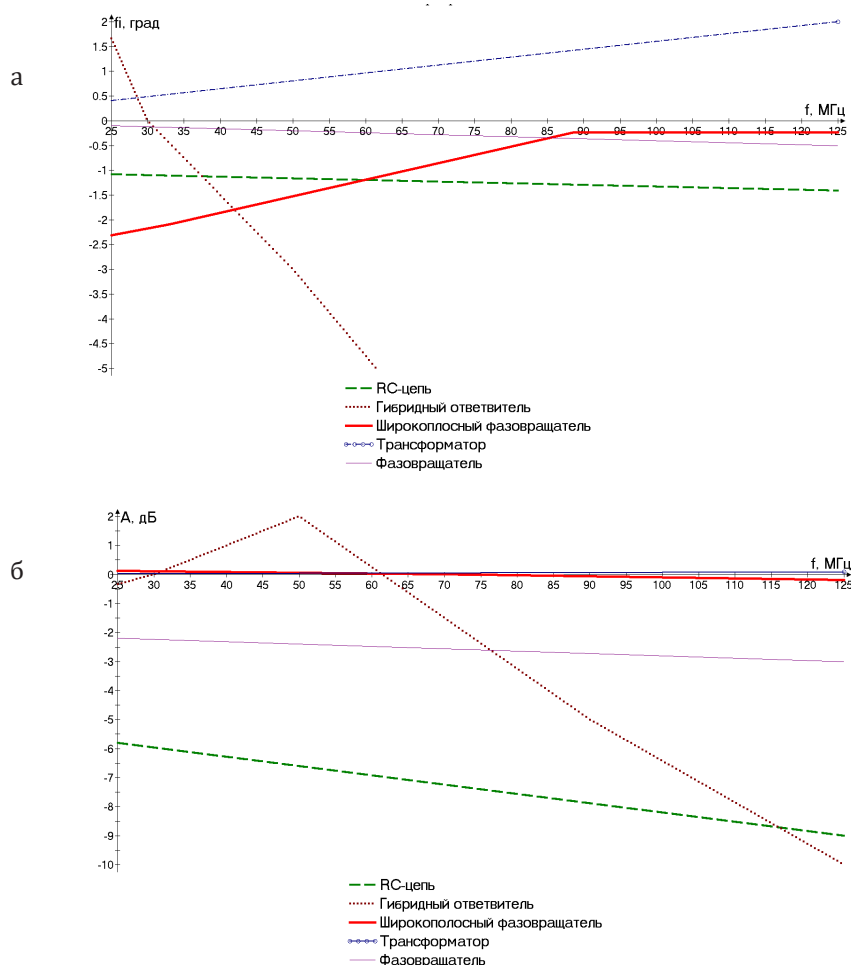


Рис. 12. Характеристики фазовращателей:

а) фазовый дисбаланс плечей; б) амплитудный дисбаланс плечей.

В выражении (17) суммарный баланс фаз блоков 2 и 3 (рис. 2) в зависимости от частоты $\psi(f)$ можно оценить путем сложения функций баланса фаз смесителя (рис. 10а) и баланса фаз фазовращателей (рис. 12а) для каждого вида фазовращателей, соответственно. Аналогично можно провести оценку функции суммарного дисбаланса плечей $b(f)$ (рис. 10б и 12б, соответственно). После получения зависимости избирательности от частоты по выражению (16), проведена оценка избирательности и уровня мощности шумов на выходе схемы. Результаты расчета сведены в таблице.

Выходные параметры различных схем.

Блок 2	Блок 3	Мощность шумов, дБм	Избирательность на центральной частоте 14325 МГц, дБ
Схема без подавления		–90.96	0
НМС8191	RC-цепь	–91.85	10
НМС8191	гибридный ответвитель	–90.96	12
НМС8191	широкополосный фазовращатель	–93.97	31
НМС8191	трансформатор TC1-1+	–93.93	27.8
НМС8191	фазовращатель PS-927	–93.1	24

Наиболее низким уровнем шумов на выходе обладает схема с применением наиболее широкополосных цепей – цепи второго и более высокого порядков и трансформатор. При этом различие в мощности шума незначительно и составляет сотые доли децибел, и для понижения уровня шумов на промежуточной частоте, принимаемых с зеркального канала, на 2.5–3 дБ, достаточно избирательности, обеспечиваемой схемой с фазовым разбалансом плечей порядка 50 и амплитудным разбалансом порядка 0.5 дБ. Более широкополосные цепи целесообразно применять в случае, если требования по избирательности в широкой полосе обусловлены необходимостью увеличения отношения сигнал-помеха. В данном примере не рассматривался вариант применения моста Ланге, поскольку промежуточная частота составляет 75 МГц. В данном частотном диапазоне такой фазовращатель нереализуем, поскольку обладает большими физическими размерами. Менее широкополосные цепи, обеспечивающие фазовый и амплитудный баланс в узком диапазоне частот, такие как RC-цепь, гибридный ответвитель, обеспечивая достаточный для некоторых задач уровень подавления зеркального канала, обладают более высоким уровнем шумов на выходе схемы. Это объясняется тем, что мощность шумов пропорциональна ширине канала приема, а, следовательно, необходимо обеспечивать подавление зеркального канала в широком диапазоне частот с достаточным уровнем (25–30 дБ), что нереализуемо ввиду неприемлемого фазового и амплитудного балансов на краях частотного диапазона для указанных фазовращателей. При такой схемной реализации рекомендуется применение дополнительных фильтров во входных цепях.

На рис. 13 показана кривая зависимости избирательности схемы на частотах зеркального канала приема.

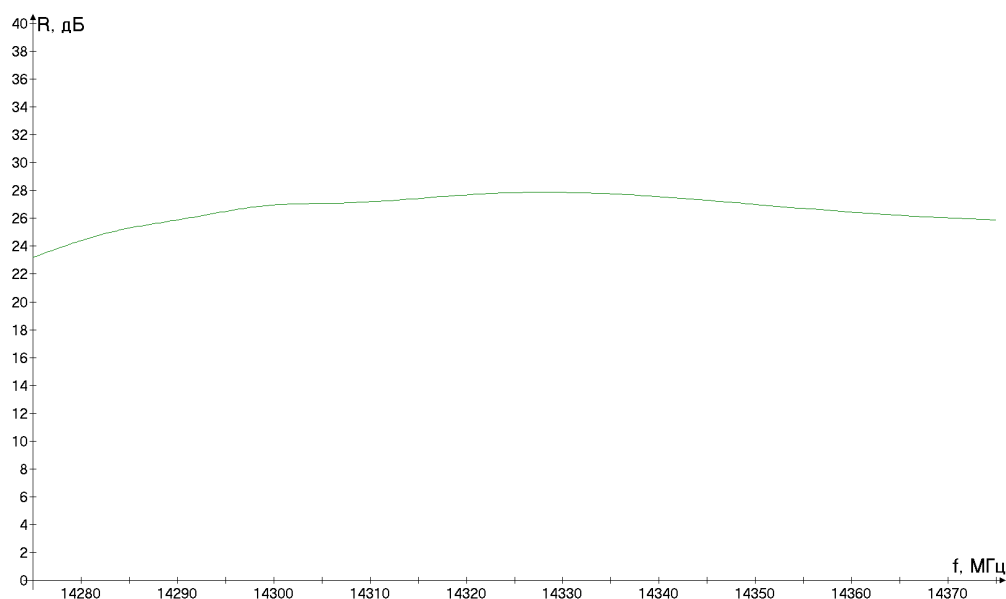


Рис. 13. Зависимость избирательности схемы от частоты.

Из результатов расчета избирательности схемы, реализованной с помощью микросхемы НМС8191 и трансформатора ТС1-1 (рис. 13), следует, что данный параметр составляет не менее 22 дБ. Данная величина избирательности позволяет на 2.5–3 дБ снизить шумы, вызванные переносом тепловых шумов с зеркального канала приема. Для увеличения избирательности необходимо улучшать параметр баланса фаз схемы, путем подбора фазовращателя с меньшим дисбалансом фаз плечей. Другой путь повышения избирательности заключается в подборе фазовращателя с дисбалансом фаз плечей, противоположным по знаку дисбалансу плечей смесителя. В таком случае будет наблюдаться некоторая компенсация, и суммарный дисбаланс будет более низким. Аналогичную компенсацию можно обеспечить и для амплитудного дисбаланса, но поскольку для большинства квадратурных смесителей и фазовращателей данный параметр не превышает 0.5–0.7 дБ в требуемой полосе, дисбаланс амплитуд оказывается не критичным параметром для повышения избирательности. Наиболее существенным с точки зрения повышения избирательности представляется фазовая компенсация.

Заключение

Одним из недостатков приемных устройств, построенных по супергетеродинной схеме, является наличие побочного канала приема – зеркального. Двумя различными альтернативными способами его подавления являются фильтрация с помощью преселектора и рассмотренный в настоящей работе фазовый метод. Наличие зеркального канала приема в приемном устройстве приводит не только к ухудшению отношения сигнал-помеха, но и к увеличению мощности тепловых шумов. На основании расчетов, представленных в настоящей работе, доказано, что подавление зеркального канала на 22 дБ позволяет уменьшить уровень шумов в полосе промежуточных частот на 2.5–3 дБ. Данный уровень подавления может быть обеспечен фазовым методом, что доказано с помощью ма-

тематической модели, системотехнического моделирования и практического примера реализации схемы. Также, на основе модели, показано, что с помощью фазового метода возможно обеспечение высокого (не менее 40 дБ) подавления зеркального канала путем амплитудной и фазовой компенсации квадратурных плечей схемы.

Литература / References:

1. Haruoka M., Utsurogi Y., Matsuoka T., Taniguchi K. A Dual-band Image-reject Mixer for GPS with 64dB Image Rejection. In: IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, Oct. 2003. P. 168-169. <https://doi.org/10.1109/WCT.2003.1321472>
2. Haruoka M., Utsurogi Y., Matsuoka T., Taniguchi K. A. Study on the LO Phase Error Compensation of GPS Dual-Band Image-Reject Mixer. *IEICE Trans. Electron.* 2003;J86-C(11):1177-1183. <https://doi.org/10.1002/ecjb.20061>.
3. Kazuhiro N., Hiroyuki M., Masaomi T., Kenji K., Moriyasu M., Yoji. I.A Planar Image Rejection Mixer with 135/45 deg Power Dividers. In: IEEE MTT-S International Microwave Symposium. June 2007. P. 1401-1404. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2007.380493>.
4. Harvey J. C., Harjani R. An Integrated Quadrature Mixer with Improved Image Rejection at Low Voltage. In: Proc. 14th International Conference on VLSI Design (VLSI DESIGN 2001). 2001. P. 269-273. <https://doi.org/10.1109/ICVD.2001.902672>.
5. Harvey J. C., Harjani R. Analysis and design of an integrated quadrature mixer with improved noise, gain and image rejection. In: Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2001. V. 4. P. 786-789. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2001.922355>
6. Darabi H., Abidi A.A. Noise in RF-CMOS mixers: a simple physical model. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2000;35(1):15-25. <https://doi.org/10.1109/4.818916>.
7. Carrera A., Rohmer G. Novel Design Methodology for Low-power Image-reject Mixers. In: Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. 05 March 2007. P. 261-264. <https://doi.org/10.1109/SMIC.2007.322808>.
8. Fang J.S., Bellaouar A., Li S.T., Allstot D.J. An image-rejection down-converter for low-IF receivers. *IEEE Microw. T. Theory.* 2005;53(2):478-487. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.840759>.
9. Cetin E., Topcu S., Kale I. Design and low-power implementation of an adaptive image rejection receiver. In: Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 18-21 May 2008. P. 3146-3149. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2008.4542125>.
10. Walker J.L.B. Improvements to the Design of the 180° Rat Race Coupler and its Application to the design of Balanced Mixers with High LO to RF Isolation. In: IEEE MMT-S Digest. 1997. V. II. P. 747-750. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1997.602898>.
11. Younus Md., Mohammed I. Phase Calibration Technique for Mismatch Optimization in Image-Reject Receivers. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.* 2006;46(2):165-168. <https://doi.org/10.1007/s10470-005-0851-7>.
12. Kravchenko R., Markov K., Orlenko D., Sevskiy G., Heide P. Implementation of a miniaturized lumped-distributed balun in balanced filtering for wireless applications. In: European Microwave Conference. November 2005. V. 2. P. 1306. <https://doi.org/10.1109/EUMC.2005.1610174>.
13. Yang B., Zhiqiang Yu., Jianyi Z. A low noise S-band image rejection mixer based on enhancement mode pHEMT. In: Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2017. P. 508-512. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293191>.
14. Mayer B. Planar broadband image rejection mixer. *Electronics Letters.* 1991;27(23):2128-2130. <http://dx.doi.org/10.1049/el:19911318>.
15. Wen H., Changjun L. Compact half-wave balun using microstrip and lumped-element artificial transmission lines. In: Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2012. V. 1. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2012.6229909>.

Об авторе:

Вишняков Рустам Рустамович, аспирант кафедры радиоэлектронные системы и комплексы Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0002-8630-5109>

About the author:

Rustam R. Vishnyakov, Postgraduate student of Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo, Moscow, 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0002-8630-5109>

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-48-58>



УДК 621.391.072

Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов с дифференциальной фазовой манипуляцией при наличии релеевских замираний и гармонической помехи

**Г.В. Куликов[@],
Нгуен Ван Зунг,
До Чунг Тиен**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Широкое распространение различных радиосистем с фазовой манипуляцией, в том числе и многопозиционной (М-ФМ – MPSK), обусловлено их высокой помехоустойчивостью и простотой построения передающей и приемной частей аппаратуры. В реальной аппаратуре при реализации схем передатчиков и приемников используется дополнительное (относительное) кодирование и, соответственно, применяются сигналы ДМФМ (DMPSK). Одним из способов приема таких сигналов является применение автокорреляционного демодулятора (АКД), построенного по квадратурной схеме. В статье проведено исследование помехоустойчивости автокорреляционного демодулятора сигналов с дифференциальной фазовой манипуляцией при наличии в радиоканале гауссовского шума, релеевских замираний и гармонической помехи. Определены статистические параметры сигналов и помех в синфазном и квадратурном каналах АКД. При $M = 2$ и 4 получены аналитические формулы для вероятности символьной ошибки, условной по случайной фазе гармонической помехи. Проверено, что формула при $M = 2$ без гармонической помехи сводится к выражению, известному из литературы. Значения безусловных вероятностей символьных ошибок получены численным усреднением. Показано, что гармоническая помеха с малой интенсивностью практически не сказывается на помехоустойчивости демодулятора, и в этом случае доминирующее влияние оказывают релеевские замирания. Если интенсивность помехи равна 0.5, то дополнительные энергетические потери за счет гармонической помехи составляют уже около 1.5 дБ ($M = 2$) и около 3 дБ ($M = 4$) по сравнению со случаем, когда отсутствует такая помеха.

Ключевые слова: дифференциальная фазовая манипуляция, автокорреляционный демодулятор, гармоническая помеха, релеевские замирания, помехоустойчивость.

Для цитирования: Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен. Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов с дифференциальной фазовой манипуляцией при наличии релеевских замираний и гармонической помехи. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):48-58. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-3-48-58>

Noise immunity of autocorrelation demodulator of signals with differential phase shift keying in the presence of rayleigh fading and harmonic interference

Gennady V. Kulikov[@],
Nguyen Van Dung,
Do Trung Tien

MIREA – Russia Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

The wide spread of various radio systems with phase shift keying, including multi-position (MPSK), is due to their high noise immunity and ease of construction of the transmitting and receiving parts of the equipment. In real equipment, additional differential (relative) encoding is used when implementing transmitter and receiver circuits and, accordingly, DMPSK signals are used. One of the ways to receive such signals is to use an autocorrelation demodulator built on a quadrature scheme. The paper studies the noise immunity of an autocorrelation demodulator of signals with differential phase shift keying in the presence of Gaussian noise, Rayleigh fades and harmonic interference in the radio channel. The statistical parameters of signals and interference in the inphase and quadrature channels of the autocorrelation demodulator are determined. For $M = 2$ and 4, analytical formulas are obtained for the probability of a symbolic error, conditional on the random phase of harmonic. It is verified that the formula at $M = 2$ without harmonic interference reduces to an expression known from the literature. The values of the unconditional probabilities of symbolic errors are obtained by numerical averaging. It is shown that at a low level of harmonic interference, Rayleigh fading has a dominant effect. With a large level of interference, the additional energy loss can be several decibels, and at $M = 4$ these losses are significantly greater than at $M = 2$.

Keywords: differential phase shift keying, autocorrelation demodulator, harmonic interference, Rayleigh fading, noise immunity.

For citation: Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Do Trung Tien. Noise immunity of autocorrelation demodulator of signals with differential phase shift keying in the presence of Rayleigh fading and harmonic interference. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):48-58 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-3-48-58>

Введение

Фазовая манипуляция (ФМ), в том числе и многопозиционная М-ФМ, используется во многих цифровых системах передачи информации. Для приема таких сигналов наряду с методом оптимального когерентного приёма используются методы оптимально-

го некогерентного приёма и автокорреляционные алгоритмы [1]. Характеристики помехоустойчивости оптимальных когерентных приемников таких сигналов хорошо изучены для многих помеховых ситуаций [1–10], но, как известно, такие алгоритмы предполагают наличие в демодуляторе непростой системы формирования опорных колебаний, поэтому в связи с простотой исполнения на практике часто отдается предпочтение неоптимальным методам приема, которые менее сложны, хотя и проигрывают оптимальным в помехоустойчивости. Так, автокорреляционный алгоритм позволяет применить в качестве опорного колебания задержанный сигнал. При этом используется дифференциальное кодирование информации и, соответственно, дифференциальная (относительная) многопозиционная фазовая манипуляция (ДМФМ, английский термин – *differential multiple phase shift keying*, DMPSK). Число возможных значений фаз посылок M обычно невелико и составляет, как правило, 2, 4 или 8.

Автокорреляционный демодулятор (АКД) в этом случае строится по квадратурной схеме и содержит два канала – синфазный (верхний) и квадратурный (нижний) (рис. 1) [1, 2]. В некоторых схемах в качестве ФНЧ1 и ФНЧ2 используют интеграторы.

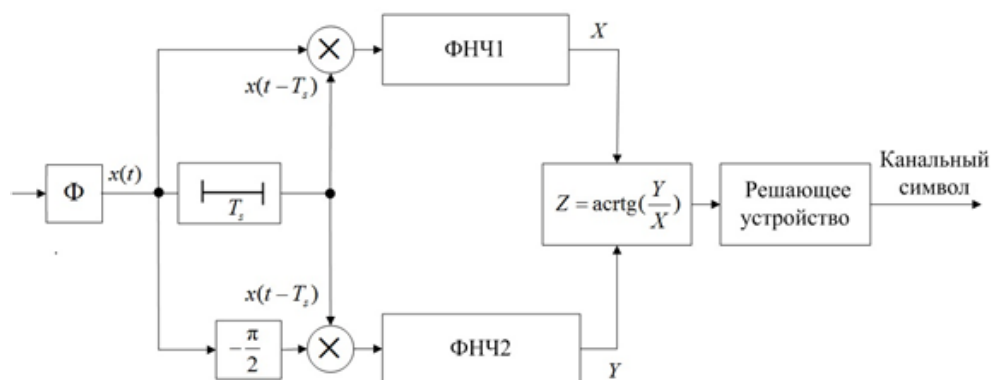


Рис. 1. Структурная схема автокорреляционного демодулятора ДМФМ сигналов.

В связи со сложностью определения статистических характеристик процессов на входе решающего устройства анализ помехоустойчивости такого демодулятора выполнен для частных случаев [1–3], большей части касающихся приема бинарных ФМ сигналов и сигналов 4-ФМ на фоне шумовой помехи. Однако в литературе мало исследований помехоустойчивости автокорреляционного приема сигналов с 2-ФМ и 4-ФМ для случаев, когда в радиоканале присутствуют шумовые и нефлуктуационные помехи.

Целью данного исследования является получение характеристик помехоустойчивости автокорреляционного демодулятора сигнала ДМФМ при наличии на его входе различных помех – гармонической, мультипликативной (релейские замирания) и шумовой.

1. Модели сигнала и помех

Две соседние посылки сигнала ДМФМ на i -ом и $(i-1)$ -ом тактовых интервалах, равных длительности канального символа T_s , запишем следующим образом

$$\begin{aligned} s_i(t) &= A \cos(\omega_0 t + \varphi_1), \quad t \in ((i-1)T_s, T_s], \\ s_{i-1}(t) &= A \cos(\omega_0 t + \varphi_2), \quad t \in ((i-2)T_s, (i-1)T_s], \end{aligned} \quad (1)$$

где $A = \sqrt{2E_s/T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = E_b \log_2 M$ – энергия канального символа; E_b – энергия,

приходящаяся на один бит информации; ω_0 – несущая частота; φ_1 и φ_2 – фазы посылок, разность которых несет информацию о канальном символе и может принимать одно из M возможных значений, отличающихся на величину $2\pi/M$.

Рассмотрим ситуацию, когда в канале радиосвязи кроме полезного сигнала (1) присутствует аддитивный флуктуационный шум $\xi(t)$, прицельная гармоническая помеха $s_{\Pi}(t) = \mu A \cos(\omega_0 t + \eta)$ с относительной интенсивностью μ и случайной равномерно распределенной фазой η . При этом и сигнал, и помеха испытывают медленные релеевские замирания, характеризующиеся коэффициентом β :

$$\varpi(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

2. Вывод формул для вероятностей символьных ошибок

Для анализа помехоустойчивости АКД воспользуемся методикой, изложенной в [11, 12]. Узкополосный принимаемый процесс $x(t)$ после селективного фильтра Φ на входе приемника, настроенного на несущую частоту сигнала, разложим на квадратурные составляющие и запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} x(t) &= \beta A \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \beta \mu A \cos(\omega_0 t + \eta) + \xi(t) = \\ &= \beta_c A \cos \omega_0 t \cos \varphi_1 + \beta_c \mu A \cos \omega_0 t \cos \eta + \xi_c(t) \cos \omega_0 t - \\ &\quad - \beta_s A \sin \omega_0 t \sin \varphi_1 - \beta_s \mu A \sin \omega_0 t \sin \eta - \xi_s(t) \sin \omega_0 t, \end{aligned}$$

где β_c , β_s и $\xi_c(t)$, $\xi_s(t)$ – квадратурные компоненты коэффициента β и огибающей шумового колебания, имеющие гауссовские распределения.

Процесс на втором входе перемножителя синфазного канала АКД, задержанный на длительность канального символа, имеет вид:

$$\begin{aligned} x(t - T_s) &= \beta A \cos[\omega_0(t - T_s) + \varphi_2] + \beta \mu A \cos[\omega_0(t - T_s) + \eta] + \xi(t - T_s) = \\ &= \beta_c A \cos \omega_0(t - T_s) \cos \varphi_2 + \beta_c \mu A \cos \omega_0(t - T_s) \cos \eta + \xi_c(t - T_s) \cos \omega_0(t - T_s) - \\ &\quad - \beta_s A \sin \omega_0(t - T_s) \sin \varphi_2 - \beta_s \mu A \sin \omega_0(t - T_s) \sin \eta - \xi_s(t - T_s) \sin \omega_0(t - T_s). \end{aligned}$$

Тогда на выходе ФНЧ1 синфазного канала после фильтрации составляющей с частотой $2\omega_0$:

$$X(t) = LF[x(t) \cdot x(t - T_s)]|_{2\omega_0} = r_1 r_2 + r_3 r_4, \quad (3)$$

где $LF[\cdot]$ – оператор, соответствующий фильтру нижних частот,

$$\begin{aligned} r_1 &= \beta_c A \cos \varphi_1 + \beta_c \mu A \cos \eta + \xi_c(t), \\ r_2 &= \beta_c A \cos \varphi_2 + \beta_c \mu A \cos \eta + \xi_c(t - T_s), \\ r_3 &= \beta_s A \sin \varphi_1 + \beta_s \mu A \sin \eta + \xi_s(t), \\ r_4 &= \beta_s A \sin \varphi_2 + \beta_s \mu A \sin \eta + \xi_s(t - T_s). \end{aligned} \quad (4)$$

При выводе этих выражений учтено, что $\omega_0 T_s = 2\pi k$, где k – целое [1].

Выражение (4) может быть записано в виде квадратичной формы:

$$4 X(t) = p_1^2 + p_2^2 - p_3^2 - p_4^2,$$

в которую входят гауссовские случайные величины:

$$\begin{aligned} p_1 &= (r_1 + r_2) = \beta_c A (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) + 2\beta_c \mu A \cos \eta + \xi_c(t) + \xi_c(t - T_s), \\ p_2 &= (r_3 + r_4) = \beta_s A (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) + 2\beta_s \mu A \sin \eta + \xi_s(t) + \xi_s(t - T_s), \\ p_3 &= (r_1 - r_2) = \beta_c A (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) + \xi_c(t) - \xi_c(t - T_s), \\ p_4 &= (r_3 - r_4) = \beta_s A (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) + \xi_s(t) - \xi_s(t - T_s). \end{aligned}$$

Такая квадратичная форма характеризуется ковариантной матрицей [8]:

$$\mathbf{K}_p = \begin{pmatrix} \langle p_1^2 \rangle & \langle p_1 p_2 \rangle & \langle p_1 p_3 \rangle & \langle p_1 p_4 \rangle \\ \langle p_2 p_1 \rangle & \langle p_2^2 \rangle & \langle p_2 p_3 \rangle & \langle p_2 p_4 \rangle \\ \langle p_3 p_1 \rangle & \langle p_3 p_2 \rangle & \langle p_3^2 \rangle & \langle p_3 p_4 \rangle \\ \langle p_4 p_1 \rangle & \langle p_4 p_2 \rangle & \langle p_4 p_3 \rangle & \langle p_4^2 \rangle \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Для упрощения дальнейших записей обозначим

$$\sigma^2 = \langle \beta_c A \rangle^2 / 2 = \langle \beta_s A \rangle^2 / 2; .$$

Элементы матрицы (5) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \langle p_1^2 \rangle &= \sigma^2 (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + 2\mu \cos \eta)^2 + 2\sigma_\xi^2, \\ \langle p_2^2 \rangle &= \sigma^2 (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + 2\mu \sin \eta)^2 + 2\sigma_\xi^2, \\ \langle p_3^2 \rangle &= \sigma^2 (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)^2 + 2\sigma_\xi^2, \\ \langle p_4^2 \rangle &= \sigma^2 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)^2 + 2\sigma_\xi^2, \\ \langle p_1 p_2 \rangle &= \langle p_2 p_1 \rangle = \langle p_1 p_4 \rangle = \langle p_4 p_1 \rangle = 0, \\ \langle p_1 p_3 \rangle &= \langle p_3 p_1 \rangle = \sigma^2 (\cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2 + 2\mu (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \cos \eta), \\ \langle p_2 p_3 \rangle &= \langle p_3 p_2 \rangle = \langle p_3 p_4 \rangle = \langle p_4 p_3 \rangle = 0, \\ \langle p_2 p_4 \rangle &= \langle p_4 p_2 \rangle = \sigma^2 (\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2 + 2\mu (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \sin \eta). \end{aligned}$$

В [11] показано, что, если корреляционная матрица квадратичной формы имеет подобную структуру, то вероятность

$$\begin{aligned} p[X(t) < 0] &= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{\sqrt{1 - S^2}} \right], \\ R &= \frac{\langle r_1 r_2 \rangle}{\sqrt{\langle r_1^2 \rangle \langle r_2^2 \rangle}}; S = \frac{\langle r_1 r_4 \rangle}{\sqrt{\langle r_1^2 \rangle \langle r_2^2 \rangle}} \end{aligned} \quad (6)$$

Используя (6), можно найти вероятности правильного и ошибочного приема канального символа при условии, что передавалась та или иная комбинация символов с разностью фаз $\Delta\varphi$. Используем это в последующих расчетах.

Здесь с учетом (4)

$$\begin{aligned}\langle r_1^2 \rangle &= \sigma^2 (\cos \varphi_1 + \mu \cos \eta)^2 + \sigma_\xi^2, \quad \langle r_2^2 \rangle = \sigma^2 (\cos \varphi_2 + \mu \cos \eta)^2 + \sigma_\xi^2, \\ \langle r_1 r_2 \rangle &= \sigma^2 (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \mu (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \cos \eta + \mu^2 \cos^2 \eta), \quad \langle r_1 r_4 \rangle = 0.\end{aligned}$$

Последнее равенство означает, что $S = 0$ и

$$p[X(t) < 0] = \frac{1}{2}(1 - R). \quad (7)$$

Аналогично могут быть найдены соответствующие выражения для квадратурного канала (рис. 1). Для этого учтем фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем $(-\pi/2)$, следующим образом:

$$\begin{aligned}x(t, -\pi/2) &= \beta A \cos(\omega_0 t + \varphi_1 - \pi/2) + \beta \mu A \cos(\omega_0 t + \eta - \pi/2) + \xi(t, -\pi/2) = \\ &= \beta_c A \cos \omega_0 t \sin \varphi_1 + \beta_c \mu A \cos \omega_0 t \sin \eta + \xi_c(t) \sin \omega_0 t + \\ &+ \beta_s A \sin \omega_0 t \cos \varphi_1 + \beta_s \mu A \sin \omega_0 t \cos \eta + \xi_s(t) \cos \omega_0 t.\end{aligned}$$

В этом случае:

$$\begin{aligned}r_1 &= \beta_c A_0 \sin \varphi_1 + \beta_c \mu A_0 \sin \eta + \xi_c(t), \\ r_2 &= \beta_c A_0 \cos \varphi_2 + \beta_c \mu A_0 \cos \eta + \xi_c(t - T_s), \\ r_3 &= \beta_s A_0 \cos \varphi_1 + \beta_s \mu A_0 \cos \eta + \xi_s(t), \\ r_4 &= -\beta_s A_0 \sin \varphi_2 - \beta_s \mu A_0 \sin \eta - \xi_s(t - T_s).\end{aligned} \quad (8)$$

При этом

$$\begin{aligned}\langle r_1^2 \rangle &= \sigma^2 (\sin \varphi_1 + \mu \sin \eta)^2 + \sigma_\xi^2, \quad \langle r_2^2 \rangle = \sigma^2 (\cos \varphi_2 + \mu \cos \eta)^2 + \sigma_\xi^2, \\ \langle r_1 r_2 \rangle &= \sigma^2 (\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \mu (\cos \varphi_2 \sin \eta + \sin \varphi_2 \cos \eta) + \mu^2 \sin \eta \cos \eta), \quad \langle r_1 r_4 \rangle = 0.\end{aligned}$$

Далее вычислим вероятности символьной ошибки для двух значений $M = 2$ и 4 . При этом учтем, что сигнальные созвездия сигналов ДМФМ являются симметричными и априорные вероятности комбинаций информационных битов в символе можно считать одинаковыми.

Обозначим отношение сигнал/шум $q = \sigma^2 / \sigma_\xi^2$.

При $M = 2$ в АКД используется только синфазный канал (рис. 1). Результаты расчетов частных вероятностей символьной (и битовой) ошибки при разных комбинациях фаз посылок сведены в табл. 1.

Таблица 1. Частные вероятности ошибки при $M = 2$

Комбинации фаз φ_1, φ_2	Вероятность ошибки	Параметры
$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0$	$P_{e1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_1 q + 1} \right)$	$c_1 = (1 + \mu \cos \eta)^2$
$\varphi_1 = \pi, \varphi_2 = \pi$	$P_{e2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_2 q + 1} \right)$	$c_2 = (1 - \mu \cos \eta)^2$
$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi$	$P_{e3} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{c_1 c_2} q}{\sqrt{(c_1 q + 1)(c_2 q + 1)}} \right)$	$c_1 = (1 + \mu \cos \eta)^2$ $c_2 = (1 - \mu \cos \eta)^2$
$\varphi_1 = \pi, \varphi_2 = 0$	$P_{e4} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{c_1 c_2} q}{\sqrt{(c_1 q + 1)(c_2 q + 1)}} \right)$	$c_1 = (1 + \mu \cos \eta)^2$ $c_2 = (1 - \mu \cos \eta)^2$

Полная вероятность символьной (битовой) ошибки при $M = 2$ равна:

$$P_e = \frac{1}{4} P(P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + P_{e4}) = \frac{1}{4} \left(\frac{0,5}{c_1 q + 1} + \frac{0,5}{c_2 q + 1} + 1 - \frac{\sqrt{c_1 c_2} q}{\sqrt{(c_1 q + 1)(c_2 q + 1)}} \right). \quad (9)$$

Без гармонической помехи при $\mu = 0$ имеем $c_1 = c_2 = 1$, и выражение (9) сводится к известной формуле, приведенной в [2]:

$$P_e = \frac{1}{2} \frac{1}{q + 1}.$$

При $M = 4$ обработка сигнала проводится в синфазном (СК) и квадратурном (КК) каналах, и вычисляется фазовый угол сигнального вектора на комплексной плоскости $Z = \arctg(Y/X)$. Схема, приведенная на рис. 1, соответствует наиболее распространенной системе формирования сигнала со сдвигом сигнального созвездия на $\pi/4$ [1], поэтому вероятность ошибочного приема символа P_e найдем через вероятность правильного приема $P_{\text{пп}}$ – вероятность попадания в соответствующий квадрант комплексной плоскости ХУ, а именно:

- для $\Delta\varphi = \pi/4$ – 1 квадрант (синфазный канал $X > 0$, квадратурный канал $Y > 0$)
- для $\Delta\varphi = 3\pi/4$ – 2 квадрант (синфазный канал $X < 0$, квадратурный канал $Y > 0$)
- для $\Delta\varphi = 5\pi/4$ – 3 квадрант (синфазный канал $X < 0$, квадратурный канал $Y < 0$)
- для $\Delta\varphi = 7\pi/4$ – 4 квадрант (синфазный канал $X > 0$, квадратурный канал $Y < 0$).

$$P_e = 1 - P_{\text{пп}X} P_{\text{пп}Y}.$$

Результаты расчетов частных вероятностей символьной ошибки при разных значениях разностей фаз посылок сведены в табл. 2.

Полная вероятность символьной ошибки при $M = 4$ равна:

$$P_e = \frac{1}{4} P(P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + P_{e4}).$$

Таблица 2. Частные вероятности ошибки при $M = 4$

Разность фаз посылок	Канал	Рпп	Параметры	Вероятность ошибки
$\Delta\varphi = \pi / 4$	СК	$P_{\text{ппX1}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{m_1 m_2 q}}{\sqrt{(m_1 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_1 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \cos \eta \right)^2$ $m_2 = (1 + \mu \cos \eta)^2$	$P_{e1} = 1 - P_{\text{ппX1}} P_{\text{ппY1}}$
	КК	$P_{\text{ппY1}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{m_2 m_3 q}}{\sqrt{(m_3 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_3 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \sin \eta \right)^2$	
$\Delta\varphi = 3\pi / 4$	СК	$P_{\text{ппX2}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{m_4 m_2 q}}{\sqrt{(m_4 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_2 = (1 + \mu \cos \eta)^2$ $m_3 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \sin \eta \right)^2$	$P_{e2} = 1 - P_{\text{ппX2}} P_{\text{ппY2}}$
	КК	$P_{\text{ппY2}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{m_2 m_3 q}}{\sqrt{(m_3 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_4 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \cos \eta \right)^2$	
$\Delta\varphi = 5\pi / 4$	СК	$P_{\text{ппX3}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{m_4 m_2 q}}{\sqrt{(m_4 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_2 = (1 + \mu \cos \eta)^2$ $m_4 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \cos \eta \right)^2$	$P_{e3} = 1 - P_{\text{ппX3}} P_{\text{ппY3}}$
	КК	$P_{\text{ппY3}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{m_5 m_2 q}}{\sqrt{(m_5 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_5 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \sin \eta \right)^2$	
$\Delta\varphi = 7\pi / 4$	СК	$P_{\text{ппX4}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{m_1 m_2 q}}{\sqrt{(m_1 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_1 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \cos \eta \right)^2$ $m_2 = (1 + \mu \cos \eta)^2$	$P_{e4} = 1 - P_{\text{ппX4}} P_{\text{ппY4}}$
	КК	$P_{\text{ппY4}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{m_5 m_2 q}}{\sqrt{(m_5 q + 1)(m_2 q + 1)}} \right)$	$m_5 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \mu \sin \eta \right)^2$	

В общем случае аналитическая запись весьма громоздка, но для случая без гармонической помехи при $\mu = 0$ имеем более простое выражение:

$$P_e = 1 - \frac{1}{4} \left(1 + \frac{q}{\sqrt{(q+2)(q+1)}} \right)^2. \quad (10)$$

3. Результаты оценки помехоустойчивости автокорреляционного демодулятора сигналов ДМФМ

Полученные выражения для вероятностей символьной ошибки являются условными по параметру η – случайной фазе гармонической помехи. Проведя численное усреднение, получим окончательные результаты.

На рис. 2 показаны зависимости вероятности символьной ошибки от отношения сигнал/шум в радиоканале с релейскими замираниями и гармонической помехой. Видно, что гармоническая помеха с малой интенсивностью $\mu = 0.1$ (кривая 2) и $\mu = 0.3$ (кривая 3)

практически не сказывается на помехоустойчивости демодулятора, и в этом случае доминирующее влияние оказывают релейские замирания. Если $\mu = 0.5$ (кривая 4), то для $P_{ef} = 10^{-1}$ дополнительные энергетические потери за счет гармонической помехи составляют уже около 1.5 дБ ($M = 2$) и около 3 дБ ($M = 4$) по сравнению со случаем, когда отсутствует такая помеха (кривая 1).

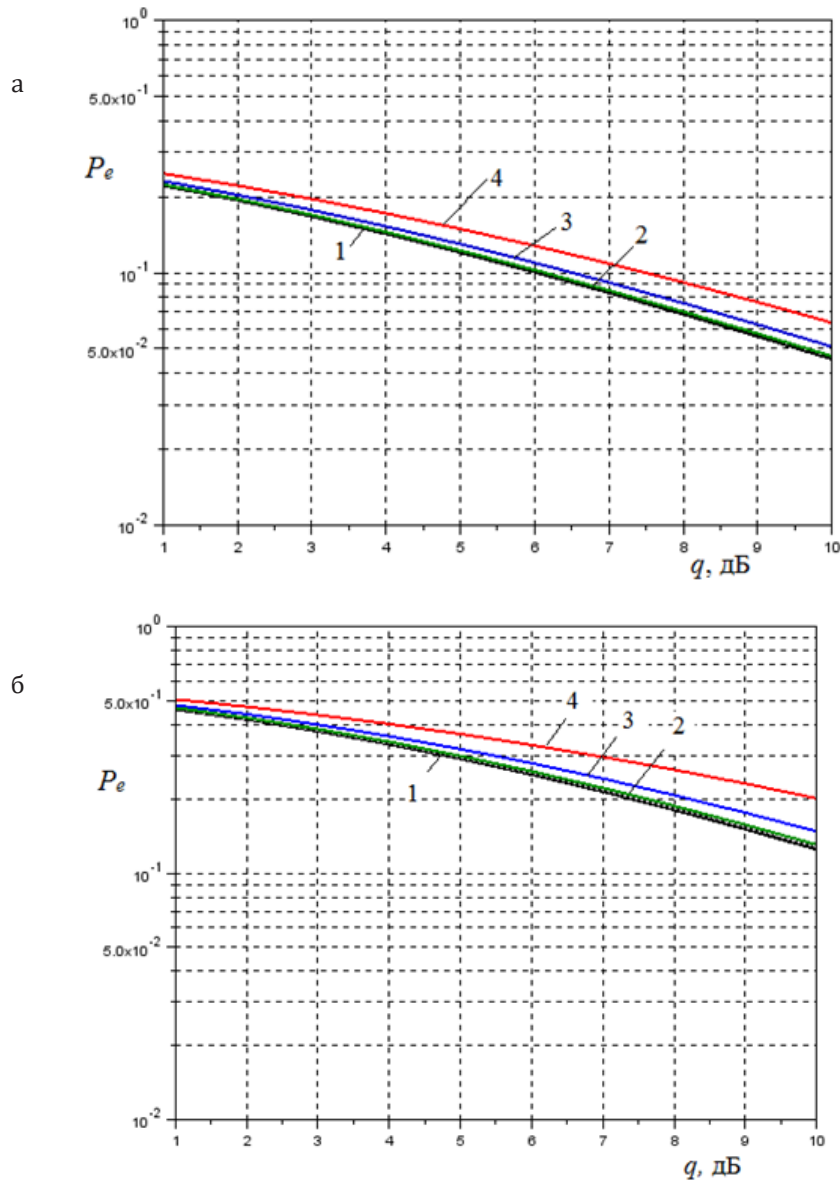


Рис. 2. Зависимости вероятности символьной ошибки от отношения сигнал/шум в радиоканале с релейскими замираниями и гармонической помехой
а) для $M = 2$; б) для $M = 4$.

Заключение

В статье проведен анализ помехоустойчивости автокорреляционного демодулятора сигналов с дифференциальной фазовой манипуляцией при наличии в радиоканале релейских замираний и гармонической помехи. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов ДМФМ существенно снижается при наличии в радиоканале релеевских замираний и гармонической помехи. Влияние замираний сказывается сильнее, чем влияние гармонической помехи.
2. При большом уровне гармонической помехи дополнительные энергетические потери могут составлять несколько децибел, причем при $M = 4$ эти потери существенно больше, чем при $M = 2$.
3. В реальных системах передачи информации там, где высока вероятность появления такого рода помех, необходимо предусмотреть устройства для их компенсации.

Литература:

1. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами. М.: Советское радио, 1991. 296 с. ISBN 5-256-00730-0
2. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е, переработанное, дополненное. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
3. Fuqin Xiong. Digital modulation techniques. Second edition. Artech House Telecommunications Library; 2006. 1039 p.
4. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ., под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
5. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Наукоемкие технологии*. 2018;(11):32-38. <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
6. Deepak K. Chy, Md. Khaliluzzaman. Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER. *Wireless Comm. Mobile Comput.* 2015;3(1):7-12. <https://doi.org/10.11648/j.wcmc.20150301.12>
7. Stošović S.N., Dimitrijević B.R., Milošević N.D., Nikolić Z.B. Frequency Offset Influence on MDPSK Signal Reception in Fading Channel. *Telfor J.* 2013;5(2):88-91. http://journal.telfor.rs/Published/Vol5No2/Vol5No2_A1.pdf
8. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. [электронный журнал]. 2019;(3). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
9. Maheswaran P., Selvaraj M.D. Dynamic SSK-BPSK System Under Transmitter Correlated Nonidentical Rayleigh Fading. *IEEE Systems J.* 2019;13(2):1202-1209. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2828220>
10. Belkacem Y.M., Bentata S.E. BPSK Demodulator Signal Processing for Satellite Communication System. In: 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul, Turkey. 2019. P. 485-490.
11. Хворостенко Н.П. Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. М.: Связь, 1968. 336 с.
12. Куликов Г.В. Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов МЧМ в канале связи с гармонической помехой. *Радиотехника*. 2004;(8):20-22.

References:

1. Okunev Yu.B. *Tsifrovaya peredacha informatsii fazomanipulirovannymi signalami* (Digital transmission of information by phase-shifted signals). Moscow: Sovetskoe radio; 1991. 296 p. (in Russ.). ISBN 5-256-00730-0
2. Fink L.M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenii* (The theory of transmission of discrete messages). Moscow: Sovetskoe radio; 1970. 728 p. (in Russ.).
3. Fuqin Xiong. Digital modulation techniques. Second edition. Artech House Telecommunications Library. Artech House; 2006. 1039 p.
4. Proakis J. Digital communications. 5th ed. McGraw-Hill Comp.; 2008. 1150 p.
5. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase-shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;(11):32-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
6. Deepak K. Chy, Md. Khaliluzzaman. Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER. *Wireless Comm. Mobile Comput.* 2015;3(1):7-12. <https://doi.org/10.11648/j.wcmc.20150301.12>
7. Stošović S.N., Dimitrijević B.R., Milošević N.D., Nikolić Z.B. Frequency Offset Influence on MDPSK Signal Reception in Fading Channel. *Telfor J.* 2013;5(2):88-91. http://journal.telfor.rs/Published/Vol5No2/Vol5No2_A1.pdf
8. Nguyen Van Dung. Noise immunity of a coherent reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of a retranslated interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. [online journal]. 2019; (3) (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>

9. Maheswaran P., Selvaraj M.D. Dynamic SSK-BPSK System Under Transmitter Correlated Nonidentical Rayleigh Fading. *IEEE Systems J.* 2019;13(2):1202-1209. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2828220>
10. Belkacem Y.M., Bentata S.E. BPSK Demodulator Signal Processing for Satellite Communication System. In: 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul, Turkey. 2019. P. 485-490.
11. Khvorostenko N.P. *Statisticheskaya teoriya demodulyatsii diskretnykh signalov* (Statistical theory of demodulation of discrete signals). Moscow: Svyaz'; 1968. 336 p. (in Russ.).
12. Kulikov G.V. Noise immunity of the autocorrelation demodulator of MSK signals in a communication channel with harmonic interference. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2004;(8):20-22 (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>.

Нгуен Ван Зунг, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

До Чунг Тиен, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>.

Nguyen Van Dung, Postgraduate Student of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Do Trung Tien, Postgraduate Student of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-59-80>



УДК 699.88

Сорбционный кабельный сенсор с большим диапазоном чувствительности и области его применения

**С.А. Кудж¹,
В.С. Кондратенко¹,
А.Ю. Рогов^{1,@},
Ю.И. Сакуненко²,
Е.А. Дружинин³**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²ООО «Инжиматик», Москва 105484, Россия

³ЗАО «РСК Технологии», Москва, 121170, Россия

@Автор для переписки, e-mail: ray40@ya.ru

В работе рассматриваются существующие подходы по использованию точечных и кабельных датчиков для контроля протечек и влажности окружающей среды. Показаны принципиальные недостатки систем контроля на их основе: при детектировании протечек существует задержка во времени срабатывания, обусловленная условием скопления жидкости вокруг датчиков; при контроле влажности протяженных сред возникает необходимость установки большого числа точечных датчиков с индивидуальными каналами коммутации; не существует универсального датчика контроля протечек и влажности. Предложено альтернативное решение – сорбционный кабельный сенсор с большим диапазоном чувствительности, который, как детектор протечек может быть размещен в любой точке 3D пространства, где появление протечки наиболее вероятно, а как линейный сенсор влажности – способен заменить точечные датчики в протяженной зоне контроля. Результаты исследований разработанных кабельных сенсоров подтверждают их высокую чувствительность, быстродействие и релаксационную способность восстанавливаться (высыхать) после воздействия протечки. Рассмотренные в статье области

применения, примеры внедрения сорбционного кабельного сенсора в систему контроля протечек и влажности воздуха вычислительных узлов с жидкостным охлаждением российских суперкомпьютеров, свидетельствуют о высокой эффективности и потенциале разработки. На основе сорбционных кабельных сенсоров возможно построение эффективных систем раннего обнаружения протечек по первым признакам их проявления, систем контроля влажности окружающей среды и универсальных систем контроля протечек, прорывов пара и уровня относительной влажности воздуха. Сокращение времени обнаружения протечек и прорывов пара позволит принимать превентивные меры для предотвращения развития ущерба, а применение кабельных сенсоров влажности взамен распределенных точечных датчиков позволит кардинально снизить затраты на организацию контроля влажности протяженных сред.

Ключевые слова: сорбционный кабельный сенсор, протечка, датчик влажности, вода, пар, влажность, относительная влажность воздуха, система жидкостного охлаждения, автоматизированная система контроля протечек.

Для цитирования: Кудж С.А., Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Сакуненко Ю.И., Дружинин Е.А. Сорбционный кабельный сенсор с большим диапазоном чувствительности и области его применения. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):59-80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-59-80>

Sorption cable sensor with large sensing range and fields of its application

**Stanislav A. Kudzh¹,
Vladimir S. Kondratenko¹,
Aleksandr Yu. Rogov^{1,@},
Yuriy I. Sakunenko²,
Egor A. Druzhinin³**

¹MIREA - Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²LLC «Engimatic», Moscow 105484, Russia

³JSC «RSK Technologies», Moscow 121170, Russia

@Corresponding author e-mail: ray40@ya.ru

The paper discusses the existing approaches to the use of point and cable sensors to control leaks and humidity. The principal disadvantages of monitoring systems based on them are shown: when detecting leaks, there is a delay in the response time due to the condition of fluid accumulation around the sensors; when controlling the humidity of extended environments, it becomes necessary to install a large number of point sensors with individual switching channels; there is no universal sensor for monitoring leaks and humidity. An alternative solution is proposed - a sorption cable sensor with a large sensitivity range, which, as a leak detector, can be placed anywhere in 3D space where leakage is most likely, and as a linear humidity sensor, it can replace point sensors in an extended control zone. The research results of the developed cable sensors confirm their

high sensitivity, speed and relaxation ability to recover (dry) after leaking. The areas of application considered in the article, examples of the implementation of a sorption cable sensor in a system for monitoring leaks and air humidity of computing nodes with liquid cooling of Russian supercomputers testify to the high efficiency and development potential. Based on sorption cable sensors, it is possible to build effective systems for early detection of leaks by the first signs of their manifestation, environmental humidity control systems and universal leakage control systems, steam breakthroughs and the level of relative humidity. Reducing the time for detecting leaks and steam breakthroughs will allow taking preventive measures to prevent the development of damage, and the use of cable humidity sensors instead of distributed point sensors will dramatically reduce the cost of organizing humidity monitoring of extended environments.

Keywords: sorption cable sensor, leakage, humidity sensor, water, steam, humidity, relative air humidity, liquid cooling system, automated leak control system.

For citation: Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Rogov A.Yu., Sakunenko Yu.I., Druzhinin E.A. Sorption cable sensor with large sensing range and fields of its application. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(3):59-80 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-59-80>

Введение

Сенсоры играют значительную роль во всех областях человеческой деятельности. В зависимости от назначения они могут использоваться как в промышленности, так и в быту. Одними из важнейших задач контроля за состоянием сложно-технических объектов является контроль протечек и влажности среды. Для организации контроля протечек на ограниченных площадях, как правило, используются точечные датчики, а в случае протяженных объектов целесообразно применение линейных кабельных сенсоров [1]. Современные средства контроля влажности среды оснащаются преимущественно точечными датчиками. Поэтому в случае протяженного объекта для организации мониторинга влажности требуется распределенная система с множеством каналов коммутации, что приводит к ее удорожанию [2].

Для большинства критических объектов, например, таких как центры обработки данных (ЦОД), наличие двух систем, контролирующих протечки и микроклимат, является обязательным [3]. Сенсоры обеих систем могут располагаться в одних и тех же зонах машинных залов, например, внутри серверных шкафов, но информационно они не будут связаны.

Очевидным направлением унификации таких систем является применение универсального сенсора, способного детектировать как протечки, так и изменения уровня относительной влажности воздуха.

Несмотря на эволюцию развития систем обнаружения протечек в течение нескольких десятилетий принцип работы как точечных, так и кабельных гидросенсоров не претерпел существенных изменений и основывается на заливе (замыкании) электрических контактов, которые в целях защиты от ложных тревог приподняты над поверхностью пола или дна специального лотка для сбора жидкости [4, 5]. Данная конструктивная особенность современных гидросенсоров обуславливает их общий недостаток – задержку во времени срабатывания, так как пока не образуется скопление жидкости определенного уровня вокруг точечного датчика или участка кабельного сенсора, сигнал тревоги не появится.

Очевидно, что в течение этого времени задержки срабатывания гидросенсора ущерб от протечки будет развиваться.

Следует отметить, что современные гидросенсоры принципиально не детектируют воздействие пара и изменение уровня влажности окружающей среды.

Таким образом, весьма актуальным является создание универсального кабельного сенсора с большим диапазоном чувствительности, позволяющим детектировать воздействие минимальных количеств воды или пара, а также реагировать на изменение уровня влажности окружающей среды. На основе такого кабельного сенсора могут быть созданы как универсальные системы контроля протечек и влажности среды, так и системы мониторинга с отдельным функционалом, например контроля влажности почвы.

Сорбционный кабельный сенсор – новые возможности в гидросенсорике и контроле влажности среды

Исследования в области создания специальных полимерных композитов с улучшенными теплопроводящими и электропроводящими свойствами, так называемых «трансэнергопластиков», создали условия для разработки отечественного датчика утечек электропроводящих жидкостей принципиально новой конструкции [6] (рис. 1).

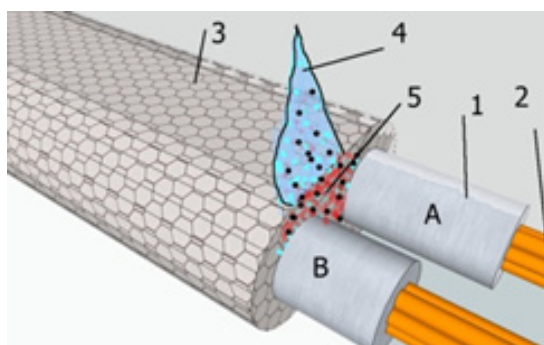


Рис. 1. Датчик утечек электропроводящих жидкостей и принцип его работы: композитная электропроводящая оболочка (1); металлический проводник (2); сорбционная оболочка (3); капля воды (4); зона частичной проводимости (5).

Принципиальным отличием отечественного сорбционного кабельного сенсора (СКС) от зарубежных аналогов является использование жил (А и В) с оболочкой из электропроводящего полимерного композита 1 и изолирующей их друг от друга сорбционной оболочкой 3, адсорбирующей жидкость протечки 4.

Исследования показали, что с помощью сорбционного кабеля такой конструкции можно детектировать не только микрокапли, но и воздействие пара. Экспериментально подтвержденный порог чувствительности СКС составляет 0,05 г воды [7].

В отличие от зарубежных аналогов, сорбционному кабельному сенсору для обнаружения протечки, прорыва пара не нужно скопление воды или накопление конденсата на полу или в специальной лотке под паропроводом (рис. 2а, б). Детектирование таких аварийных событий происходит уже при контакте сорбционной оболочки с их первыми признаками: появление капель, микротечей, движение фронта увлажнения поверхности, на которой расположен СКС (рис. 2в).



Рис. 2. Примеры размещения гидросенсорного кабеля: традиционного – на полу (а) и в лотке под трубопроводом (б); СКС – на поверхности трубопровода снизу (в).

Размещение СКС в любых точках 3D пространства, в местах наиболее вероятного появления первых признаков протечек или прорывов пара, позволяет принципиально исключить запаздывание в обнаружении аварийных ситуаций и создать условия для принятия превентивных мер по предотвращению развития ущерба.

С целью анализа свойств СКС как гидросенсора, были исследованы изменения во времени электрического сопротивления образцов кабеля различной длины при воздействии капли воды (~50 мг) в течение нескольких циклов воздействия на каждый образец. Под циклом воздействия понимается временной интервал от момента смачивания каплей самого удаленного от измерительного прибора участка образца до восстановления начального значения измеряемой величины при высыхании кабеля. Усредненные значения параметров – начальные и конечные величины электрического сопротивления; время достижения минимального значения; время высыхания образца (восстановление начальной величины электрического сопротивления) – приведены в таблице 1.

Так как при воздействии капли воды значения электрического сопротивления изменялись более чем на порядок за время соизмеримое с единицами секунд, конечные значения электрического сопротивления образцов двухжильного кабеля фиксировались сразу же после воздействия. Далее измерения показали, что в зависимости от размера капли релаксационный процесс высыхания мог начаться уже через несколько секунд, либо в течение нескольких минут. Разница во времени начала процесса высыхания вызвана тем, что при большем размере воздействующей капли часть объема воды под действием капиллярных сил распространяется в разные стороны вдоль кабеля в толще сорбционной оболочки, вызывая дополнительное уменьшение общего электрического сопротивления кабеля.

Таблица 1. Усредненные значения электрического сопротивления и временных параметров образцов СКС при воздействии капли воды

№ п/п	Длина образца двухжильного сорбционного гидросенсорного кабеля (поперечное сечение 2х4 мм), м	Начальное значение электрического сопротивления, (максимальное), МОм	Конечное значение электрического сопротивления, (минимальное) кОм	Время достижения минимальной величины электрического сопротивления, с	Время восстановления начального значения электрического сопротивления образца, мин
1	1	50.7	146	1-5	10
2	5	48.6	192	1-5	7
3	25	42.4	175	1-5	9

Данные таблицы 1 показывают, что время достижения минимальной величины электрического сопротивления), как и сами их конечные величины, для одной конструкции кабеля с выбранными длинами образцов практически одинаковы и определяются только отклонениями в объеме воздействующей капли. Большой объем капли снижал электрическое сопротивление образца до меньшей величины, и восстановительный процесс высыхания длился дольше.

Исследовалась также емкостная составляющая тех же образцов, как псевдо-плоских конденсаторов, у которых роль обкладок выполняют электропроводящие жилы, а диэлектрической прокладки – сорбционная оболочка в пространстве между ними.

Измерения показали, что в сухом состоянии, при относительной влажности окружающего воздуха не более 30%, значения электрических емкостей образцов СКС примерно пропорциональны его длине, а при воздействии капли воды, также изменяют свою величину скачкообразно в сторону повышения значений (табл. 2).

При соприкосновении капли с сорбционной оболочкой, молекулы воды заполняют пористую структуру диэлектрической прокладки, повышают ее диэлектрическую проницаемость, повышая значение электрической емкости образца кабеля. Следует отметить, что диэлектрическая проницаемость пористой структуры диэлектрической прокладки складывается из значений диэлектрической проницаемости воздуха (~1), переплетенной полимерной нити (~3–5) и воды (~80) [8], причем молекулы воды, вытесняя воздух из пор диэлектрической прокладки, вносят преобладающий вклад в изменение электрической емкости всего кабеля.

Как и в случае с измерениями временных зависимостей изменений электрического сопротивления, время восстановления начальных значений электрической емкости образцов двухжильного кабеля зависело только от вариаций объема воздействующей капли, и укладывалось в подобный временной интервал в пределах 10–11 минут.

С точки зрения энергопотребления, емкостные датчики более выгодны, чем резистивные [9], поэтому при использовании сорбционного кабеля целесообразно рассматривать электрическую емкость, как регистрируемую величину.

Для определения местоположения протечки с помощью СКС могут быть использованы два способа: зонный или линейный. Зонный способ заключается в том, что в каждой зоне контроля 3D пространства размещается кабельный сенсор требуемой длины с персональным идентификационным номером. При срабатывании кабельного сенсора по его идентификационному номеру определяется зона, в которой произошла протечка. Линейный способ основан на использовании СКС большой длины, которые прокладываются по требуемым точкам контроля, а местоположение воздействия протечки, приводящей к электрическим неоднородностям в кабеле, детектируется методом импульсной рефлектометрии [10].

Таблица 2. Усредненные значения электрической емкости и временных параметров образцов СКС при воздействии капли воды

№ п/п	Длина образца двухжильного сорбционного гидросенсорного кабеля (поперечное сечение 2x4 мм), м	Начальное значение электрической емкости, (минимальное), nF	Конечное значение электрической емкости, (максимальное), nF	Время достижения максимальной величины электрической емкости, с	Время восстановления начального значения электрической емкости образца, мин
1	1	0.174	17.1	1-5	11
2	5	0.582	13.0	1-5	8
3	25	2.2	16.2	1-5	9

Исследования возможности применения рефлектометрического метода для обнаружения мест воздействия протечек на сорбционный кабельный сенсор проводились с использованием рефлектометра РЕЙС-105 М1 [11]. Анализ полученных рефлектограмм показал, что с помощью данного метода возможно определение местоположения замкания кабеля, оценка длины замкнутого участка (масштаба протечки), а по изменению его протяженности во времени – динамики развития протечки [12].

Следует отметить, что качество рефлектограмм зависит от конструкции кабеля [13], в частности эффективность импульсной рефлектометрии намного выше при зондировании разработанного коаксиального кабеля (рис. 3) [14] по сравнению с двухжильным.

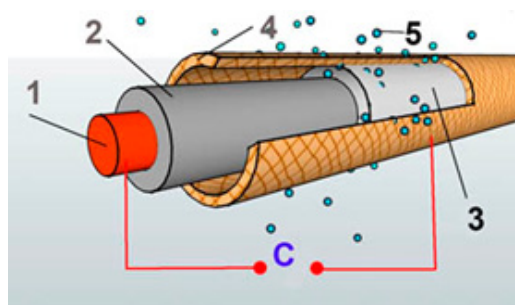


Рис. 3. Универсальный сорбционный кабельный сенсор: металлический проводник (1); композитная электропроводящая оболочка (2); сорбционная капиллярно-пористая оболочка – диэлектрическая прокладка (3); металлическая сетка-экран (4); молекулы воды (5).

Созданный коаксиальный СКС позволяет детектировать изменения уровня влажности окружающей среды, прорывы пара, протечки, а его коаксиальная конструкция обеспечивает эффективное применение метода импульсной рефлектометрии для детектирования местоположения участков замкания кабеля.

Для организации контроля протечек на предприятиях радиоэлектронной промышленности, в центрах обработки данных, внутри корпусов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) были разработаны модификации коаксиальной конструкции универсального СКС с внешней диэлектрической оболочкой 5 (рис. 4а) и дополнительным металлическим сетчатым экраном 6 (рис. 4б) [15, 16].

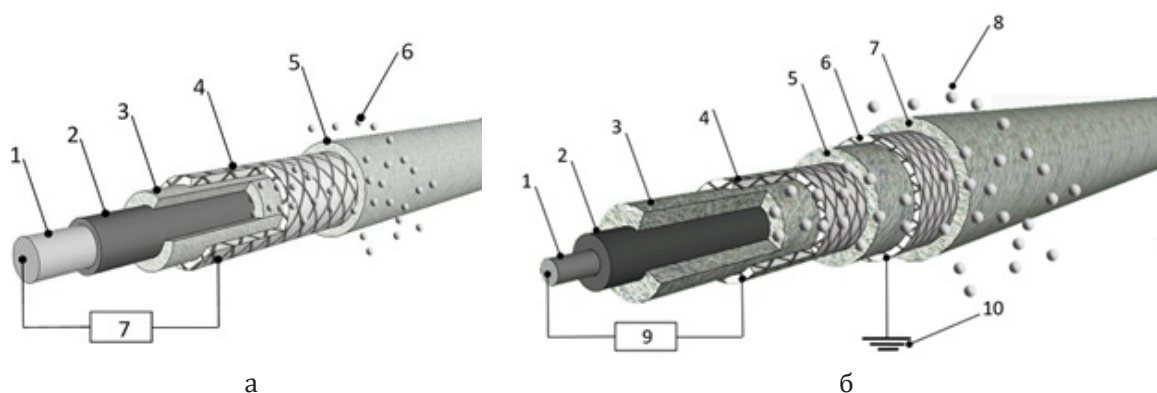


Рис. 4. Усовершенствованный сорбционный кабельный сенсор: с внешней диэлектрической оболочкой 5 (а); с дополнительным металлическим сетчатым экраном 6 и внешней диэлектрической оболочкой 7 (б).

Изолирующая оболочка 5 исключает случайный электрический контакт СКС с корпусами и элементами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а взаимное электромагнитное влияние кабеля и РЭА, где это необходимо, блокирует металлическая сетка-экран 6, также покрытая сорбционной оболочкой 7.

Следует отметить, что электрическая емкость коаксиального кабеля эквивалентна емкости протяженного цилиндрического конденсатора [17]. В конструкции СКС роль конденсаторных обкладок выполняют внешняя сторона композитной электропроводящей оболочки 2 и внутренняя поверхность металлического сетчатого экрана 4, а диэлектрической прокладкой служит сорбционная капиллярно-пористая оболочка 3.

С целью проведения сравнительной оценки влияния воды (~50 мг), имитирующей воздействие на СКС первых признаков протечки, были выбраны три образца различных по конструкции и размерам сорбционных кабелей длиной по 3 метра (табл. 3).

Таблица 3. Описание конструкции образцов сорбционного кабельного сенсора

№ п/п	Конструкция и краткое наименование образца	Описание конструкции	Размеры /начальное значение емкости
1	 Обр. 1_ _Коаксиальный_ d=2,5 мм	Коаксиальный кабель состоит из: – центральной жилы (пучок из семи проводников, покрытый электропроводящим композитом); – внутренней изолирующей сорбционной оболочки; – металлического сетчатого экрана; – внешней изолирующей сорбционной оболочки. Плотность намотки сорбционных оболочек – 100%, металлического сетчатого экрана (сетка желтых двухжильных проводов между оболочками) – 50%	Диаметр – 2,5 мм, длина – 3 м / 1,2 nF
2	 Обр. 2_ _Коаксиальный_ d=3,0 мм	Коаксиальный кабель состоит из: – центральной жилы (пучок из семи проводников, покрытый электропроводящим композитом); – внутренней изолирующей сорбционной оболочки; – металлического сетчатого экрана; – внешней изолирующей сорбционной оболочки. Плотность намотки сорбционных оболочек – 150%, металлического сетчатого экрана (сетка из желтых двухжильных проводов между оболочками) – 50%	Диаметр – 3,0 мм, длина – 3 м / 0,76 nF
3	 Обр. 3_ _Двухжильный_ сечение 2x4 мм	Двухжильный кабель с плоским поперечным сечением. Каждая жила представляет собой пучок из семи проводников, покрытый электропроводящим композитом. Жилы покрыты индивидуальными сорбционными оболочками и скреплены общей сорбционной оболочкой. Плотность намотки сорбционных оболочек – 100%. Плотность намотки скрепляющей сорбционной оболочки – 30%	Поперечное сечение – 2x4 мм, длина – 3 м / 0,3 nF

Зависимости электрической емкости от времени каждого из образцов СКС при воздействии воды на расстоянии 3 метра от измерительного прибора представлены на рис. 5.

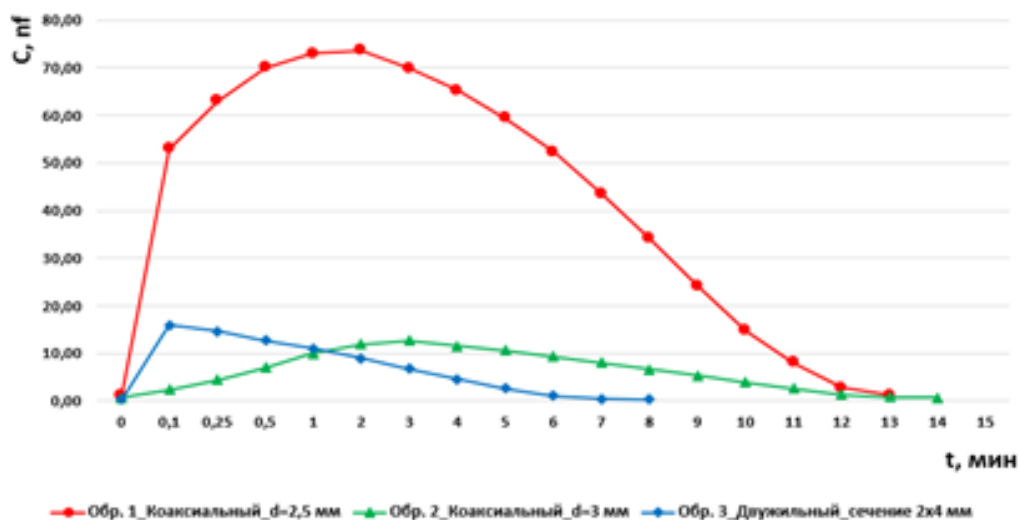


Рис. 5. Зависимости электрической емкости от времени образцов СКС длиной 3 м при воздействии воды (~50 мг).

Анализ зависимостей (рис. 5) позволяет сделать вывод, что максимальная скорость реакции на соприкосновение с водой имеет коаксиальный кабель с сорбционными оболочками базовой толщины (образец 1, плотность намотки – 100%), чему способствует их быстрое смачивание. Второе место по этому показателю занимает образец 3 двухжильного кабеля, у которого каждая жила имеет собственную сорбционную оболочку базовой толщины, а обе жилы скреплены дополнительной сорбционной оболочкой с плотностью намотки 30%, увеличивающей общий объем сорбционной оболочки образца по всей его длине. Образец 2 коаксиального кабеля (плотность намотки – 150%) показал самый медленный рост значений электрической емкости и самый большой цикл реакции на воздействие.

В условиях неизменного уровня относительной влажности воздуха, не превышающего значение 30%, время релаксации для всех исследуемых образцов составило не более 15 минут, что свидетельствует о высокой степени самовосстановления работоспособности гидросенсоров такого типа.

Сорбционный кабельный сенсор был разработан, прежде всего, с целью создания на его основе конкурентоспособных отечественных автоматизированных систем контроля протечек промышленного назначения и для домохозяйств, обеспечивающих раннее обнаружение первых признаков протечек и создающих условия для принятия превентивных мер по предотвращению развития ущерба. На основе СКС возможно также создание ряда автоматизированных технических решений, реализующих контактный метод контроля влажности среды, например, влажности бетона при созревании или почвы для автоматизации полива. Возможны и комбинированные технические решения по контролю протечек, прорывов пара, уровня относительной влажности воздуха.

Автоматизированный контроль протечек и уровня относительной влажности воздуха в вычислительных узлах высокопроизводительных вычислительных систем с жидкостным охлаждением

Актуальной проблемой и сдерживающим фактором широкого внедрения высокопроизводительных вычислительных систем с жидкостным охлаждением являются риски протечек из жидкостных каналов радиаторов охлаждения, установленных непосредственно в корпусах вычислительных узлов сверхплотного размещения в серверных стойках [18].

Традиционные решения защиты от протечек в таких системах строятся на гидросенсорах, устанавливаемых в поддоне каждой серверной стойки и срабатывающих при заливе, что крайне неэффективно и не снимает риски повреждения дорогостоящих вычислительных узлов.

На основе сорбционных кабельных сенсоров был реализован альтернативный подход к контролю протечек хладоносителя и уровня относительной влажности воздуха во внутреннем объеме корпусов вычислительных узлов с жидкостным охлаждением.

На рис. 6 показано высокоплотное вычислительное поле «РСК Торнадо» с контактной системой жидкостного охлаждения, реализованное в суперкомпьютере им. Н.Н. Говоруна Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Моск. обл.) [19], в котором система контроля протечек и уровня относительной влажности воздуха во внутренних объемах корпусов вычислительных узлов построена на СКС.

Система контроля протечек суперкомпьютера реализована на основе стека мониторинга и управления «РСК БазИС», и в дежурном режиме отслеживает изменения уровня относительной влажности воздуха внутри каждого из вычислительных узлов. Данная информация используется системой управления для недопущения возникновения «точки росы» [20]. Также в системе контроля реализован специальный алгоритм обнаружения протечки по скорости изменения сигнала от СКС [21].

Следует отметить, что за период эксплуатации система контроля протечек продемонстрировала высокую надежность и обеспечила детектирование нетипичного возрастания уровня сигнала от СКС одного из вычислительных узлов, причем данное изменение носило плавный характер, и система не детектировала его как протечку. В результате проверки была обнаружена микрощель во входном штуцере канала циркуляции хладоносителя, через которую он

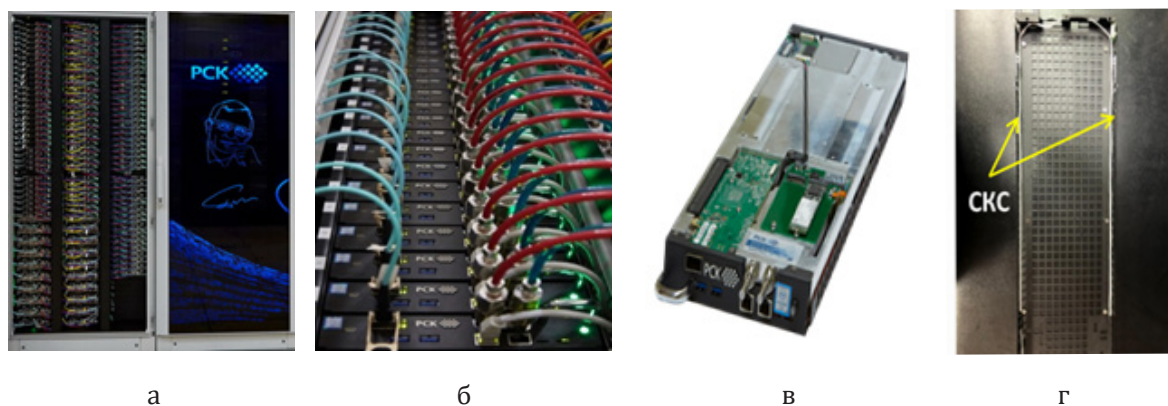


Рис. 6. Вычислительное поле «РСК Торнадо»: высокоплотное размещение вычислительных узлов (а, б); вычислительный узел с жидкостным охлаждением (в); размещение СКС в корпусе (г).

начал «парить», повышая уровень влажности внутри корпуса вычислительного узла. Превентивная замена неисправного элемента позволила избежать протечки в будущем.

Зарекомендовавшая себя с положительной стороны система контроля протечек и уровня относительной влажности воздуха позволила производителю суперкомпьютеров принять решение об оснащении такими системами новых и модернизируемых вычислительных систем.

Очередным объектом внедрения системы контроля протечек стал Межведомственный суперкомпьютерный центр Российской академии наук (МСЦ РАН) [22], который является одним из самых мощных российских вычислительных центров коллективного пользования в сфере науки и образования, и его технологической основой также является отечественная универсальная высокоплотная и энергоэффективная платформа «РСК Торнадо» [22].

У стека программного обеспечения «РСК БазИС» имеются функциональные возможности мониторинга и управления территориально распределенными центрами обработки данных, что позволяет обеспечить контроль уровня влажности и статуса протечки во всех вычислительных узлах суперкомпьютеров, вне зависимости от места их географического расположения и числа.

Промышленная автоматизированная система контроля протечек воды и прорывов пара

Первая в России опытная промышленная автоматизированная система контроля протечек воды и прорывов пара (АСКП) на основе сорбционных кабельных сенсоров была создана в 2017 году совместно специалистами Физико-технологического института РТУ МИРЭА и компании ТВИН ТК (г. Москва) [23]. В АСКП была реализована трехуровневая информационная структура и зонный принцип обнаружения протечек воды и прорывов пара (рис. 7).

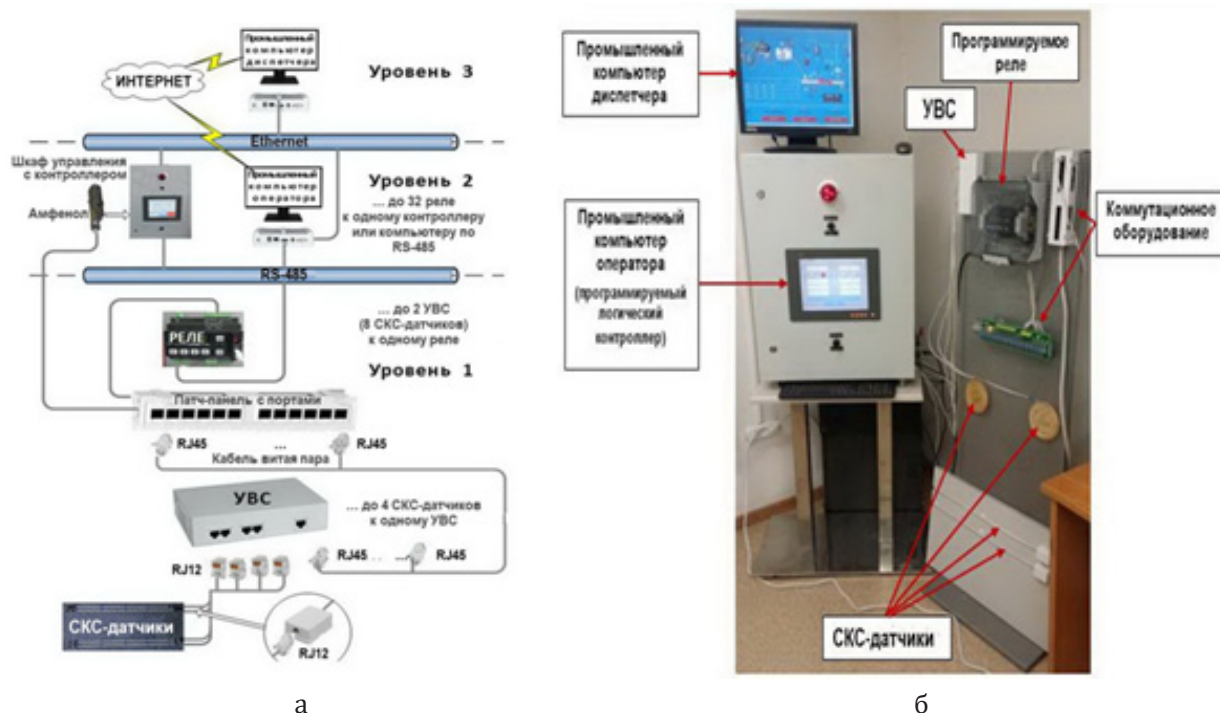


Рис. 7. Трехуровневая автоматизированная система контроля протечек воды и прорывов пара: структурная схема (а); состав опытного образца (б).

Первый уровень системы состоит из СКС-датчиков, представляющих собой отдельные сорбционные кабельные сенсоры требуемой длины, подключенные к устройствам ввода сигнала (УВС). В УВС реализован алгоритм обработки, позволяющий обнаруживать протечки и прорывы пара в условиях колебания уровня относительной влажности воздуха. Сигнал срабатывания УВС идентифицирует зону аварийного события и запускает автоматический алгоритм действий, в программируемом реле (в опытном образце модель ОВЕН ПР200). В зависимости от типа аварийного события такими действиями могут быть: включение свето-звуковой сигнализации; запуск приводов запорной арматуры; инициация сообщений об аварии по каналам связи установленным потребителям.

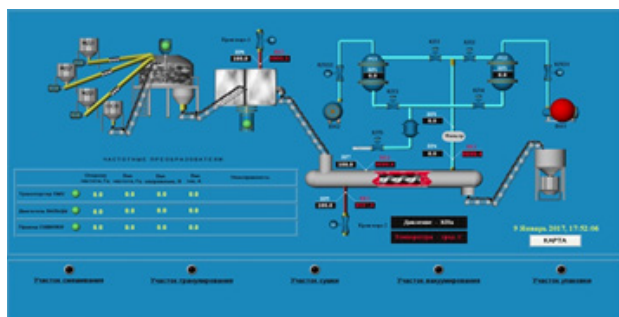
Через интерфейс программируемого реле информация об аварийном событии поступает на второй информационный уровень, например, на промышленный компьютер оператора участка производства, на экране которого с помощью мнемосхемы красным цветом выделяется источник протечки (рис. 8).



Рис. 8. Мнемосхема визуализации протечки в зоне насоса ВН1 на мониторе промышленного компьютера оператора участка производства.

Появление на экране оператора участка производства мнемосхемы со статусом протечки, как правило, дублируется сигналом сигнализации.

Третий уровень АСКП представлен промышленным компьютером диспетчера, который с помощью мнемосхем может контролировать аварийные события на одном или нескольких производствах (рис. 9).



а



б

Рис. 9. Визуализация аварийного события на компьютере диспетчера: общая мнемосхема производства с аварийным сигналом протечки в зоне насоса ВН1 (а); вид мнемосхемы с аварийным сигналом на карте размещения производств в городах центрального региона страны (б).

В случае необходимости контроля протечек воды или прорывов пара на протяженных объектах в АСКП может использоваться сорбционный кабель большой длины, а в качестве устройства ввода сигнала – импульсный рефлектометр.

Объектами контроля промышленных АСКП могут быть теплоэлектроцентрали, атомные электростанции, промышленные предприятия, центры обработки данных, объекты ЖКХ (котельные, насосные станции и др.), жилищные комплексы, торгово-развлекательные центры, гостиницы, офисные центры, медучреждения, хранилища, архивы и другие объекты.

Высокая чувствительность СКС-датчиков позволяет размещать их непосредственно на поверхности потенциальных источников протечки, на трубопроводах систем водоснабжения и отопления, перекачивающих насосах, промышленных паропроводах, элементах запорной арматуры и др. Также с помощью сорбционных кабелей возможно организовать потолочные контуры контроля протечек, контроль протечек крыш, прорывов пара (рис. 10), что до настоящего времени не реализовано традиционной гидросенсорикой.



Рис. 10. Потенциал применений сорбционных кабельных сенсоров недоступных традиционной гидросенсорике: контроль протечек потолочного контура (а); контроль протечек крыш объектов массового пребывания людей (б); контроль прорывов паропроводов перегретого пара (в).

Следует отметить, что примером, свидетельствующим об острой необходимости оснащения системами контроля протечек крыш объектов массового пребывания людей, может служить пожар в торгово-развлекательном центре «Зимняя вишня» в 2018 году в г. Кемерово, приведший к трагическим последствиям. Специалисты исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС РФ в процессе проведения экспертизы установили, что пожар в этом ТРЦ мог возникнуть из-за короткого замыкания, вызванного протечкой в крыше [24]. Обильное таяние снега послужило причиной протечки через негерметичность кровли, которая не была своевременно обнаружена и привела к короткому замыканию электропроводки осветительной сети, вызвавшему пожар.

Автоматизированная система контроля протечек для жилищных комплексов

Существующие технические решения по защите домохозяйств от протечек не позволяют устранить все риски, связанные, например, с заливом «соседом сверху» или при прорыве радиатора системы отопления.

Общий недостаток таких систем заключается в принципе их работы – перекрытие подачи воды в квартиру при срабатывании одного из гидросенсорных датчиков, расположен-

ного на полу заливаемого помещения. Очевидно, что перекрытие труб горячего и холодного водоснабжения квартиры не остановит залив сверху и течь из радиатора отопления.

Возможность размещения сорбционного кабеля в 3D пространстве [25] позволяет приблизить сенсоры нового типа к наиболее вероятным местам появления первых признаков протечек и к самим источникам протечек. В рассмотренных случаях такими местами являются потолочный контур квартиры (рис. 11) и нижняя часть радиатора отопления, на которой может быть зафиксирован сорбционный кабель.



Рис. 11. Потолочный контур контроля протечек.

Предлагаемое альтернативное техническое решение подразумевает, что в местах вероятного появления протечек в квартире, таких как потолочные контуры помещений, стояки, днища стиральных и посудомоечных машин, радиаторы отопления и др. будут размещены номерные СКС, информационно связанные по проводному или беспроводному интерфейсу с базовой станцией квартиры. В случае реализации концепции «умного дома» и специальных протоколов связи [26] возможно построение беспроводной сети опроса статуса СКС общей станцией, например, отдельного жилого дома. Такая станция может принадлежать управляющей компании, связанной договорными отношениями по контролю протечек с собственниками квартир.

В условиях жилищного комплекса базовые станции квартир или отдельных «умных домов» могут быть объединены единым интерфейсом многоуровневой беспроводной автоматизированной системы контроля протечек для жилищных комплексов [27] с единым дежурным диспетчерским центром управляющей компании.

С целью сокращения времени определения источника протечки, принятия действенных мер по локализации протечки и минимизации ущерба в многоуровневой беспроводной автоматизированной системе контроля протечек предусмотрена визуализация процесса обнаружения протечек с помощью мнемосхем.

На рис. 12 приведен пример возможного сценария последовательности смены мнемосхем, отображающих алгоритм определения источника протечки в масштабах жилищного комплекса (ЖК) из двенадцати многоэтажных жилых домов.

На рис. 12а показана мнемосхема плана расположения домов ЖК и тревожный сигнал (мигающий красный круг, сменивший немигающий зеленый), свидетельствующий о том, что в доме № 8 многоуровневой системой контроля протечек зафиксирована протечка.

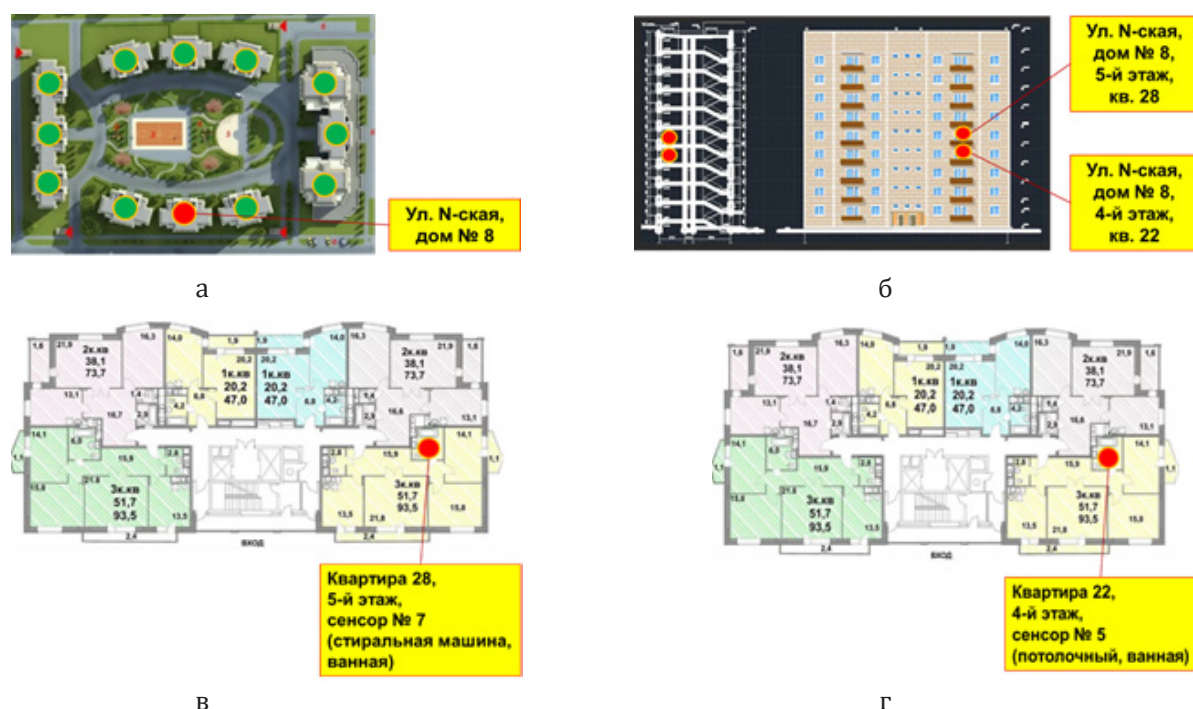


Рис. 12. Мнемосхемы возможного сценария протечек в двух квартирах многоквартирного дома № 8 жилищного комплекса.

ка. Вид сносок с дополнительной информацией может быть настроен в соответствии с требованиями заказчика. Подразумевается также, что появление сигнала о протечке на мнемосхеме плана ЖК на экране монитора дежурного диспетчера будет сопровождаться свето-звуковой сигнализацией с возможностью отключения ее после срабатывания.

Нажатие на мигающий красный круг приводит к появлению на экране дисплея мнемосхемы поэтажного плана дома (рис. 12б), которая показывает, что в результате аварийного события уже сработали СКС в двух квартирах, расположенных одна под другой.

Последовательные воздействия на мигающие красные круги квартир выводят на экран мнемосхемы с планами квартир и сносками (рис. 12в, г), дающими исчерпывающую информацию о виновной стороне залива квартиры № 22 на 4-м этаже.

Таким образом, дежурный диспетчер с помощью мнемосхем за короткое время получит информацию об источнике протечки в доме № 8 в виде стиральной машины в квартире № 28 и возможности принятия оперативных мер по локализации аварии и минимизации ущерба в квартире № 22.

Представленный сценарий предполагал что, протечка преодолевает межэтажное перекрытие за малое время. При альтернативном сценарии многоуровневая система контроля протечек, выдав сигнал об источнике протечки, создает условия для принятия своевременных мер по предотвращению ущерба нижерасположенной квартире.

Система неразрушающего контроля влажности бетонных конструкций на основе линейных кабельных сенсоров влажности

В настоящее время проблема контроля качества строительства бетонных конструкций решается многими способами, в том числе и контролем влажности бетона, как на этапе созревания, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений [28, 29]. Однако, общими

•

13. *Journal of the American Medical Association*, 277, 1996, 1611-1612.

Journal of Management Education 36(7) 809–824

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 278: 1039-1044.

Применение простейших автоматизированных систем полива с использованием таймера, включающего полив на определенное время, не решает проблему и часто приводит к ошибкам полива.

Автоматизированная система полива на основе линейных кабельных сенсоров влажности, размещенных на уровне корней растений (рис. 14) по контролируемым направлениям, позволит получать усредненное значение влажности почвы вдоль всей их длины и давать команду на полив или на остановку полива, если это значение будет выходить за пределы заданного коридора значений.

Линейные кабельные сенсоры влажности почвы способны заменить дорогостоящие беспроводные решения систем интеллектуального полива не только на полях, но, прежде всего, в тепличном овощеводстве, доля которого в мире стремительно растет [33].

Автоматизированные системы прямого контроля влажности почвы (рис. 15) позволят также оптимизировать полив в зависимости от вида культуры и ее вегетативной стадии роста.

Невысокая стоимость реализации таких систем делает их перспективными для рынка тепличного овощеводства.

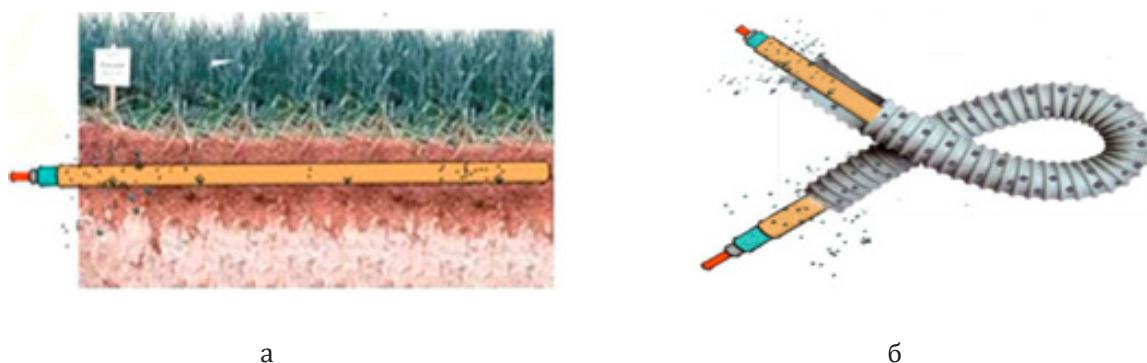


Рис. 14. Линейный кабельный сенсор влажности почвы: размещение (а); прототип (б).

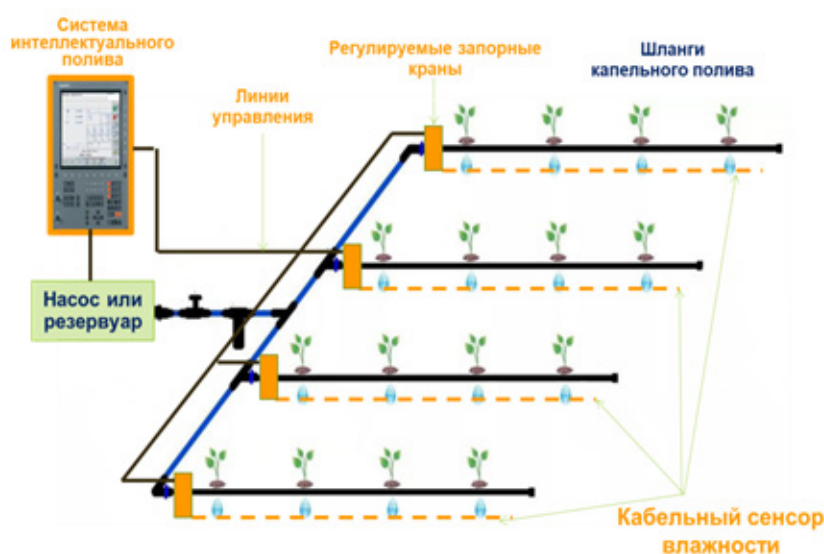


Рис. 15. Система интеллектуального полива на основе кабельных сенсоров влажности.

Система мониторинга влажности природных газов

Природный газ, добытый из газовых и газоконденсатных месторождений, как правило, насыщен парами влаги, которые в силу различных обстоятельств могут конденсироваться в газопроводных трубах и элементах газоперекачивающей инфраструктуры, вызывая их коррозию [34]. Традиционно контроль влажности перекачиваемого газа проводится в отдельных точках транспортной инфраструктуры с применением дорогостоящего оборудования, которое ограничивает количество мест такого контроля.

На основе линейных кабельных сенсоров влажности могут быть созданы системы мониторинга как для контроля уровня влажности природных газов на перекачивающих станциях, так и непосредственно внутри газопроводных труб (рис. 16) для обнаружения конденсата, что позволит принимать превентивные меры по его осушению и предотвращению коррозии [35].

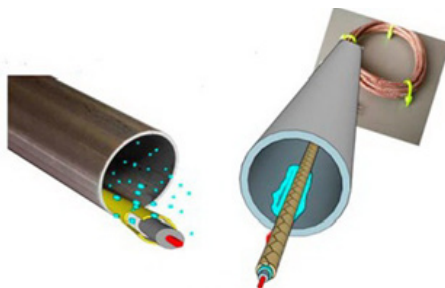


Рис. 16. Применение линейных кабельных сенсоров для контроля уровня влажности и образования конденсата в газопроводах

Заключение

Рассмотренные в работе виды сорбционных кабельных сенсоров и системы контроля на их основе имеют неоспоримые преимущества перед зарубежными аналогами и могут обеспечить прорыв в отечественной гидросенсорике и контроле влажности среды.

Возможность размещения 3D кабельных сенсоров в местах наиболее вероятного появления первых признаков протечек и прорывов пара позволяет принципиально уменьшить время обнаружения аварийных ситуаций и создает условия для снижения ущерба от протечек.

На основе линейных кабельных сенсоров большой протяженности возможно построение систем мониторинга влажности ответственных бетонных сооружений на этапах их строительства и эксплуатации, а также создание эффективных систем интеллектуального полива почвы.

Опыт успешного внедрения сорбционных кабельных сенсоров для контроля протечек хладоносителя и «точки росы» в отечественных суперкомпьютерах с жидкостным охлаждением подтверждает практическую значимость разработки и перспективы внедрения в другие сферы гидросенсорике и контроля влажности среды.

Высшая награда проекта-победителя «Сорбционные 3D сенсоры протечек воды, углеводородов, влажности среды», разработанного с участием авторов и удостоенного Главной премии для изобретателей ВОИР-2019 [36], подтверждает высокий инновационный потенциал сорбционных кабельных сенсоров, изобретенных в России.

Литература:

1. Water Leak Detection [Электронный ресурс]. <http://www.articlesfactory.com/articles/business/water-leak-detection.html>.
2. Temperature and humidity monitoring systems for fixed storage areas. Technical supplement to WHO Technical Report Series, No. 961, 2011. URL: https://www.who.int/medicines/areas/quality_safety/quality_assurance/supplement_6.pdf?ua=1
3. Data center monitoring system considerations [Электронный ресурс]. <https://searchitoperations.techtarget.com/tip/Data-center-monitoring-system-considerations>.
4. Системы защиты от протечек. [Электронный ресурс]. <https://remstd.ru/archives/antipotopnyie-sistemyi-dlya-doma/>.
5. Системы обнаружения и локализации утечек TraceTek [Электронный ресурс]. <http://www.intel-a.ru/downloads/TraceTek%20Ubersicht.pdf>.
6. Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С. Датчик утечек электропроводящих жидкостей: пат. 2545485 РФ. Заявка № 2013155730; заявл. 17.12.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
7. Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И. Сорбционный гидросенсорный кабель – новые возможности. *РИТМ машиностроения*. 2015;1:40-42.
8. Относительная диэлектрическая проницаемость [Электронный ресурс]. <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronicaemost.html>.
9. Преимущества емкостных датчиков по сравнению с датчиками других типов [Электронный ресурс]. https://studopedia.ru/9_2870_preimushchestva-emkostnih-datchikov-po-sravneniyu-s-datchikami-drugih-tipov.html
10. Технология поиска дефектов кабеля с использованием рефлектометра: замкшие участки кабеля [Электронный ресурс]. http://www.tdse.ru/info/articles/reflektom_mc_07.
11. Рефлектометр портативный цифровой. РЕЙС 105 М1. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. https://skomplekt.com/files/goods/3817431406/manual_reis_105.pdf.
12. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Сакуненко Ю.И., Сорокин А.В. Разработка методов определения места и размеров протечек с помощью сорбционного гидросенсорного кабеля. *Контроль. Диагностика*. 2018;5:32-37.
13. Метод импульсной рефлектометрии (TDR). Как найти обрыв в кабеле. [Электронный ресурс]. <http://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya/>
14. Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И. Датчик влажности: пат. 179730 РФ. Заявка № 2018104563; заявл. 06.02.2018; опубл. 23.05.2018.
15. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Исаков Д.Р. Кабельный сенсор влажности и протечек: пат. 186924 РФ. Заявка № 2018137133; заявл. 22.10.2018; опубл. 11.02.2019. Бюл. № 5.
16. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Исаков Д.Р. Кабельный сенсор влажности и протечек: пат. 187823 РФ. Заявка № 2018138657; заявл. 02.11.2018; опубл. 19.03.2019. Бюл. № 5.
17. Ёмкость цилиндрического конденсатора [Электронный ресурс]. <https://energetik.com.ru/zakony-elektrotexniki-korotko/elektricheskaya-yomkost-yomkost-kondensatora/yomkost-cilindricheskogo-kondensatora>
18. Абрамов С.М., Амелькин С.А., Чичковский А.А. Различные подходы к жидкостному охлаждению — PRO & CONTRA. *Суперкомпьютеры*. 2012;3(11):34-35.
19. Пресс-релиз. Обновленный суперкомпьютер имени Н.Н. Говоруна представлен в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне [Электронный ресурс]. <https://docplayer.ru/171270860-Press-reliz-obnovlennyy-superkompyuter-imeni-n-n-govoruna-predstavlen-v-obedinennom-institute-yadernyh-issledovaniy-v-dubne.html>
20. Точка росы [Электронный ресурс]. <http://www.teohim.ru/nalivnye/tochka-rosy/>
21. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Дружинин Е.А. Контроль протечек и влажности с помощью сорбционного кабельного сенсора в высокопроизводительных вычислительных системах с жидкостным охлаждением. *Электронные информационные системы*. 2019;1:5-18.
22. Суперкомпьютер МСЦ РАН поможет российским ученым в создании медицинских препаратов для борьбы с коронавирусной инфекцией Covid-19. [Электронный ресурс]. <http://www.rscgroup.ru/ru/news/381-superkompyuter-msc-ran-pomozhet-rossiyskim-uchenym-v-sozdanii-medicinskih-preparatov-dlya>
23. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Сакуненко Ю.И. Автоматизированная система контроля протечек воды и прорывов пара. Сборник докладов конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. М.: МИРЭА, 2018. С. 31-38.
24. Пожар в ТРЦ "Зимняя вишня" мог возникнуть из-за протечки крыши. [Электронный ресурс]. <https://www.vesti.ru/doc.html?id=3007864>
25. Спасти соседа снизу. Строительная газета № 51 от 29.12.2017 [Электронный ресурс]. <https://www.stroygaz.ru/publication/item/spasti-soseda-snizu/>

26. Технология развертывания локальных беспроводных радиосетей ZigBee в системах промышленной автоматизации и диспетчеризации. [Электронный ресурс]. <https://isup.ru/articles/3/1212/>
27. Кондратенко В.С., Рогов А.Ю., Титков М.В. Многоуровневая беспроводная автоматизированная система контроля протечек для жилищных комплексов. *Приборы*. 2019;3:13-17.
28. Влияние температуры и влажности на процесс твердения бетона. [Электронный ресурс]. <https://helpiks.org/7-91018.html>
29. Влияние внешних факторов на долговечность бетона. [Электронный ресурс]. <http://stroj-archive.ru/shlakoschelochnoy-beton/1078-vliyanie-vneshnih-faktorov-na-dolgovechnost-betona.html>
30. Водные ресурсы в сельском хозяйстве. [Электронный ресурс]. <http://мниа.пф/analytcs/Vodnye-resursy-v-selskom-hozajstve/>
31. Виртуальный агроном. [Электронный ресурс]. <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/18593-virtualnyy-agronom/>
32. Сколько нужно датчиков влажности почвы? [Электронный ресурс]. <https://decagon.ru/soil/how-many-sensors/>
33. Мировые и российские перспективы тепличного овощеводства. [Электронный ресурс]. <https://www.agroxxi.ru/stati/mirovye-i-rossiiskie-perspektivy-teplichnogo-ovoshevodstva.html>
34. Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Нагуманов Х.Г. Некоторые проблемы контроля влагосодержания природного газа в промышленных условиях. *Современные научные исследования и инновации*. 2015;7-1(51):32-39. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56176>
35. Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И., Тикменов В.Н. Кабельный датчик влажности. *Прикладная физика*. 2018;2:103-107.
36. Новое лицо, 3D-сенсор, "умная" перчатка. За что в России дают премии изобретателям. [Электронный ресурс]. <https://nauka.tass.ru/nauka/6596505>

References:

1. Water Leak Detection [Electronic resource]. <http://www.articlesfactory.com/articles/business/water-leak-detection.html>.
2. Temperature and humidity monitoring systems for fixed storage areas. Technical supplement to WHO Technical Report Series, No. 961, 2011. URL: https://www.who.int/medicines/areas/quality_safety/quality_assurance/supplement_6.pdf?ua=1.
3. Data center monitoring system considerations [Electronic resource]. <https://searchitoperations.techtarget.com/tip/Data-center-monitoring-system-considerations>.
4. System of protection against leaks [Electronic resource]. <https://remstd.ru/archives/antipotopnyie-sistemyi-dlya-doma/> (in Russ).
5. TraceTek leak detection and localization Systems [Electronic resource]. <http://www.intel-a.ru/downloads/TraceTek%20Ubersicht.pdf> (in Russ).
6. Sakunenko Yu., Kondratenko V. Sensor leakage of electrically conductive liquids: RF Pat. 2545485. Publ. 10.04.2015 (in Russ).
7. Kondratenko V., Sakunenko Yu. Sorption hydro-sensor cable-new opportunities. *RITM mashinostroeniya = RHYTHM of machinery*. 2015;1:40-42 (in Russ).
8. Relative permittivity. [Electronic resource]. <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronikaemost.html> (in Russ).
9. Advantages of capacitive sensors compared to other types of sensors. [Electronic resource]. https://studopedia.ru/9_2870_preimushchestva-ekonomich-datchikov-po-sravneniyu-s-datchikami-drugih-tipov.html (in Russ).
10. Technology of search of defects in the cable by using OTDR: samoxa the parts of the cable. [Electronic resource]. http://www.tdse.ru/info/articles/reflektom_mc_07 (in Russ).
11. Time domain reflectometer portable digital. FLIGHT 105 M1. Operating manual. [Electronic resource]. https://skomplekt.com/files/goods/3817431406/manual_reis_105.pdf (in Russ).
12. Kondratenko V., Rogov A., Sakunenko Yu., Sorokin A. Development of methods to determine the size and location of water leaks with the help of sorption o hydro sensor cable. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2018;5:32-37 (in Russ).
13. Pulse reflectometry (TDR) method. How to find a break in the cable [Electronic resource]. <http://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya/> (in Russ).
14. Kondratenko V., Sakunenko Yu. Humidity sensor: RF Pat. 179730. Publ. 23.05.2018 (in Russ).
15. Kondratenko V. S., Rogov A. Yu., Iskhakov D. R. Cable sensor of humidity and leaks: RF Pat. 186924. Publ. 11.02.2019 (in Russ).

16. Kondratenko V. S., Rogov A. Yu., Iskhakov D. R. Cable sensor of humidity and leaks: RF Pat. 187823. Publ. 19.03.2019 (in Russ).
17. Capacity of the cylindrical capacitor [Electronic resource]. <https://energetik.com.ru/zakony-elektrotexniki-korotko/elektricheskaya-yomkost-yomkost-kondensatora/yomkost-cilindricheskogo-kondensatora> (in Russ).
18. Abramov S. M., Amelkin S. A., Chickowski A. A. Different approaches to liquid cooling — PRO & CONTRA. *Superkomp'yuter = Supercomputers*. 2012;3(11):34-35 (in Russ).
19. Press release. The updated Govorun supercomputer is presented at the Joint Institute for nuclear research in Dubna [Electronic resource]. <https://docplayer.ru/171270860-Press-reliz-obnovlennyy-superkompyuter-imeni-n-n-govoruna-predstavlen-v-obedinennom-institute-yadernyh-issledovaniy-v-dubne.html> (in Russ).
20. Dew point [Electronic resource]. <http://www.teohim.ru/nalivnye/tochka-rozy/> (in Russ).
21. Kondratenko V.S., Rogov A. Yu., Druzhinin E.A. Monitoring leaks and humidity using a sorption cable sensor in high-performance computing systems with liquid cooling. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic information systems*. 2019;1:5-18 (in Russ).
22. The MSC RAS Supercomputer will help Russian scientists create medicines to fight Covid-19 coronavirus infection. [Electronic resource]. <http://www.rscgroup.ru/ru/news/381-superkompyuter-msc-ran-pomozhet-rossiyskim-uchenym-v-sozdanii-medicinskih-preparatov-dlya> (in Russ).
23. Kondratenko V.S., Rogov A.Yu., Sakunenko Yu.I. Automated system for monitoring water leaks and breakthroughs pair. In: Proc. "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics", Institute of Physics and technology. Moscow technological University. M.: MIREA, 2018; P. 31-38 (in Russ).
24. Fire in the shopping center "Winter cherry" could occur due to a leak in the roof. [Electronic resource]. <https://www.vesti.ru/doc.html?id=3007864> (in Russ).
25. To save the neighbor from below. *Construction newspaper*. № 51 from 29.12.2017 [Electronic resource]. <https://www.stroygaz.ru/publication/item/spasti-soseda-snizu/> (in Russ).
26. Technology for deployment of local ZigBee wireless radio networks in industrial automation and dispatching systems. [Electronic resource]. <https://isup.ru/articles/3/1212/> (in Russ).
27. Kondratenko V.S., Rogov A.Yu., Titkov V.M. Multi-level wireless automated control system of leaks for residential and hotel complexes. *Pribory = Instruments*. 2019;3:13-17.
28. Influence of temperature and humidity on concrete hardening process. [Electronic resource]. <https://helpiks.org/7-91018.html> (in Russ).
29. Influence of external factors on the durability of concrete. [Electronic resource]. <http://stroj-archive.ru/shlakoschelochnoy-beton/1078-vliyanie-vneshnih-faktorov-na-dolgovechnost-betona.html> (in Russ).
30. Water resources in agriculture. [Electronic resource]. <http://мниа.рф/analytics/Vodnye-resursy-v-selskom-hozajstve/> (in Russ).
31. Virtual agronomist. [Electronic resource]. <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/18593-virtualnyy-agronom/> (in Russ).
32. How many soil moisture sensors do I need? [Electronic resource]. <https://decagon.ru/soil/how-many-sensors/> (in Russ).
33. World and Russian perspectives of greenhouse vegetable growing. [Electronic resource]. <https://www.agroxxi.ru/stati/mirovye-i-rossiiskie-perspektivy-teplichnogo-ovoshevodstva.html> (in Russ).
34. Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Nagumanov H.G. Measurements of content in the natural gas for field conditions: some problems. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern scientific researches and innovations*. 2015;7-1(51):32-39. [Electronic resource.]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56176> (in Russ).
35. Kondratenko V.S., Sakunenko, Yu.I., Tikmenov V.N. Cable humidity sensor. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*. 2018;2:103-107 (in Russ).
36. New face, 3D sensor, smart glove. For what in Russia they give prizes to inventors. [Electronic resource.]. <https://nauka.tass.ru/nauka/6596505> (in Russ).

Об авторах:

Кудж Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Кондратенко Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор, советник ректората, заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 15834985700

Рогов Александр Юрьевич, заместитель директора Физико-технологического института, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Сакуненко Юрий Иванович, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Инжиматик» (105484, Россия, Москва, Сиреневый бульвар, д. 59, с. 1).

Дружинин Егор Александрович, технический директор ЗАО «РСК Технологии» (121170, Россия, Москва, Кутузовский пр-т, д. 36, с. 23).

About the authors:

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Vladimir S. Kondratenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, rector's adviser, head of the Department of optical and biotechnical systems and technologies, Institute of physics and technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 15834985700

Aleksandr Yu. Rogov, deputy director of Institute of physics and technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Yuriy I. Sakunenko, Cand. Sci. (Engineering), General director of LLC «Engimatic» (59 / 1, Sirenevyy bl., Moscow 105484, Russia).

Egor A. Druzhinin, technical director of JSC «RSC Technologies» (36 / 23, Kutuzovskiy pr., Moscow 121170, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-81-91>



УДК 51.7

Дискриминантный анализ параметров вариационной пульсометрии

У.И. Силкина[@],
В.А. Баландин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: usilkina@mail.ru

Статья посвящена важной прикладной задаче – исследованию variability сердечного ритма с помощью линейного дискриминантного анализа. Статистические методы часто применяются в современной медицине, особенно в кардиологии. Одним из таких методов является дискриминантный анализ, который позволяет изучать различия между группами объектов по нескольким переменным. При использовании метода дискриминантного анализа главным показателем является точность классификации, и этот показатель можно определить, оценив долю правильно классифицированных пациентов при помощи прогностического уравнения наблюдений. Разработана математическая составляющая экспресс-диагностики сердечного ритма. Исходными данными в работе являются длительности RR-кардиоинтервалов пациентов в возрасте 60–70 лет, взятые из баз медицинских сигналов открытого международного ресурса Physionet. Представлены рассчитанные параметры вариационной пульсометрии для здоровых людей при различной длительности записей ЭКГ от 5 до 30 минут. Статистическая обработка осуществлялась по стандартной методике для малых выборок с использованием критерия Стьюдента при доверительной вероятности равной 95%. Математическая обработка данных проводилась методом дискриминантного анализа параметров вариационной пульсометрии здоровых и больных пациентов с сердечной недостаточностью. Для дискриминантного анализа отобраны параметры со слабой взаимной корреляцией, разброс значений которых соответствуют нормальному закону распределения, и имеющие высокую прогностическую значимость. Определена функция, позволяющая отнести пациента к одной из категорий «болен» или «здоров». Выполненный анализ для больных с диагнозом аритмия также показал отличие от здоровых пациентов, хотя и менее выраженное. Продемонстрировано, что дискриминантный анализ в кардиологии может быть эффективно использован при экспресс-диагностике variability сердечного ритма.

Ключевые слова: дискриминантный анализ, вариационная пульсометрия, вариабельность сердечного ритма, диагностика сердечной деятельности, математическая обработка.

Для цитирования: Силкина У.И., Баландин В.А. Дискриминантный анализ параметров вариационной пульсометрии. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):81-91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-81-91>

Discriminant analysis of variational pulsometry parameters

Ulyana I. Silkina[@],
Vyacheslav A. Balandin

MIREA - Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: usilkina@mail.ru

The article is devoted to an important applied problem – the exploration of heart rate variability using linear discriminant analysis. Statistical methods are often used in modern medicine, especially in cardiology. One of these methods is discriminant analysis. It allows studying the differences between groups of objects in several variables. When using the discriminant analysis method, the main indicator is the accuracy of classification, and this indicator can be determined by estimating the proportion of correctly classified patients using a predictive observation equation. The mathematical component of the rapid diagnosis of heart rhythm was developed. The durations of the RR cardio intervals of patients at the age of 60–70 years are the initial data in the research. The data were taken from the databases of medical signals of the open international resource Physionet. The calculated parameters of variational heart rate monitoring for healthy people are presented with different duration of ECG recordings from 5 to 30 minutes. Statistical processing was performed for small samples using the Student criterion with a confidence probability of 95% according to the standard method. Mathematical data processing was carried out by the method of discriminant analysis of variational pulsometry parameters of healthy and sick patients with heart failure. The parameters with weak cross-correlation with high predictive significance, the spread of the values of which corresponds to the normal distribution law, were selected for the discriminant analysis. A function which allows to identify the patient as “sick” or “healthy” (one of the categories) has been determined. The analysis performed for patients diagnosed with arrhythmia also showed a difference from healthy patients, although less pronounced. It was demonstrated that discriminant analysis in cardiology can be effectively used for instant diagnosis of heart rate variability.

Keywords: discriminant analysis, variational pulsometry, heart rate variability, diagnosis of cardiac activity, mathematical processing.

For citation: Silkina U.I., Balandin V.A. Discriminant analysis of variational pulsometry parameters. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):81-91 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-81-91>

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются наиболее распространенными в большинстве стран мира, в том числе в России, где их вклад в общую смертность составляет 57% [1]. Для снижения этого показателя актуальным становится ранняя

диагностика ССЗ, которая может быть реализована путем организации массовых, целевых, профилактических обследований населения [2]. В настоящее время широкое распространение получили методы анализа variability сердечного ритма (ВСР), среди которых наиболее популярным для функциональной диагностики является вариационная пульсометрия, позволяющая получить достаточно надежные количественные оценки ВСР. В данной работе, представлены результаты исследования параметров вариационной пульсометрии с их последующей обработкой методами дискриминантного анализа.

Для исследования ВСР традиционно чаще других использовались следующие показатели вариационной пульсометрии: Мо (мода), Амо (амплитуда моды), dRR (вариационный размах) [3], а также рассчитанные временные показатели изменчивости ритма (pNN50 (процент соседних кардиоинтервалов, отличающихся друг от друга более чем на 50 мс), RMMSD (квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар N–N-интервалов), SDNN (стандартное отклонение)) [4].

Отмечается высокая факторная значимость двух групп показателей [4]:

а) ИН (индекс напряжения регуляторных систем), САТ (индекс симпато-адреналового тонуса), ИДМ (индекс дыхательной модуляции), pNN50, SDNN, характеризующие различные аспекты напряженности сердечной деятельности;

б) ИМА (индекс медленноволновой аритмии), ПСА (показатель сердечной аритмии), характеризующие соотношение ритмичности-аритмичности сердечной деятельности.

Помимо традиционных параметров вариационной пульсометрии в данной работе рассмотрен энтропийный показатель (H) [5], отражающий соотношение порядка и хаоса в сложных саморегулирующихся системах [6]. Основными достоинствами данных показателей является их прогностическая значимость и относительная простота вычисления [4].

Дискриминантный анализ – раздел математической статистики, направленный на разработку методов решения задач различения (дискриминации) объектов наблюдения по определенным признакам. При использовании метода дискриминантного анализа главным показателем является точность классификации, и этот показатель можно легко определить, оценив долю правильно классифицированных пациентов при помощи прогностического уравнения наблюдений [7].

В области кардиологии с помощью дискриминантного анализа определяют, в частности, различные виды тахикардий [8], стеноз коронарных артерий [9], ишемическую болезнь сердца [10].

По данным российских эпидемиологических исследований, распространенность хронической сердечной недостаточности (ХСН) среди кардиопатологий составляет 7%, в том числе клинически выраженной – 4.5%, увеличиваясь от 0.3% в возрастной группе 20–29 лет до 70% у лиц старше 90 лет [11, 12]. По прогнозу в ближайшие 20 лет ожидается увеличение распространенности ХСН на 25% [13]. Таким образом, ранняя диагностика ХСН является весьма актуальной задачей.

Объекты и методы исследования

В работе использованы фрагменты записей ЭКГ, в частности, длительности RR-интервалов из международного медицинского архива биосигналов *PhysioNet.org* [14]. Данные здоровых пациентов взяты из базы *Normal Sinus Rhythm RR Interval Database* [14]. Записи были предоставлены Медицинской школой Вашингтонского Университета, Сент-Луис

и из Колумбийского Пресвитерианского Медицинского центра, Нью-Йорк. Записи больных пациентов сердечной недостаточностью взяты из баз *Congestive Heart Failure RR Interval Database* [14] и *BIDMC Congestive Heart Failure Database* [14], а больных с аритмией – *St. Petersburg Institute of Cardiological Technics 12-lead Arrhythmia Database* [14].

В ходе исследования были выбраны записи 20 здоровых людей в возрасте 60–70 лет. Для оценки зависимости параметров вариационной пульсометрии от времени записи ЭКГ здорового человека были вычислены показатели при различных длительностях, а именно, 5, 10, 15, 20, 25, 30 минут. Значения параметров вариационной пульсометрии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характерные значения параметров ВП при различных длительностях записи

Параметры ВП	Длительность записи, минуты					Среднее	Норма
	5	10	15	20	30		
Мо, мс	734	734	641	641	641	678.2	620-800
Амо, %	33	37	17	27	30	28.8	25-38
pNN50, %	2.5	1.8	1.9	1.4	1.1	1.7	1-18
dRR, мс	321	329	368	383	383	356.8	300-450
ЧСС	79	81	82	85	85	82.4	60-80
RRNN, мс	765	740	729	711	704	729.8	660-937
SDNN	63	61	62	65	61	62.4	40-90
RMSSD	20	19	27	27	27	24	15-35
ИН	70	77	37	54	62	60	30-120
ИБР	102	113	47	70	79	82.2	48-173
ВПР	4.2	4.1	4.2	4.1	4.1	4.1	7.1-9.3
ПАПР	45	51	27	42	47	42.4	35-70
ИДМ, %	1.3	1.3	1.9	1.9	1.9	1.7	2.1-4.4
САТ	25	29	9	14	16	18.6	30-200
ИМА	0.92	0.92	0.89	0.9	0.89	0.9	14.1-44.3
CV	8.2	8.2	8.5	9.1	8.6	8.5	5-7
Н	4.9	4.9	4.9	5	4.9	4.9	4.4-5.6

Серым цветом выделены значения параметров, которые не входят в диапазон значений для здоровых людей [15, 16].

При проверке в качестве статистического критерия был применён *t*-критерий Стьюдента. Основная и альтернативные гипотезы формулируются следующим образом: H_0 – значения параметров при различных длительностях значимо не отличаются; H_1 – значения параметров при различных длительностях значимо отличаются. Поскольку фактическое значение статистического критерия меньше критического, оно попадает в область принятия гипотезы. Следовательно, нет основания отвергнуть основную гипотезу о том, что значения параметров при различных длительностях значимо не отличаются. Значения критерия Стьюдента при различных длительностях записи указаны в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, в 5-минутной записи ЭКГ сигнала 76% параметров не имеют значимых различий по сравнению со средним значением, что говорит о достаточности 5-минутных записей для корректного определения большинства параметров вариационной пульсометрии.

Таблица 2. Значения критерия Стьюдента при различных длительностях записи

Параметры ВП	<i>t</i> -критерий, минуты					Критическое значение <i>t</i> -критерия Стьюдента
	5	10	15	20	30	
Мо, мс	2.500	2.500	1.667	1.667	1.667	2.776
Амо, %	1.544	3.015	4.338	0.662	0.441	2.776
pNN50, %	3.878	0.306	0.816	1.735	3.265	2.776
dRR, мс	2.814	2.186	0.881	2.060	2.060	2.776
ЧСС	3.269	1.346	0.385	2.500	2.500	2.776
RRNN, мс	3.877	1.123	0.088	2.070	2.841	2.776
SDNN	0.938	2.188	0.625	4.063	2.188	2.776
RMSSD	2.222	2.778	1.667	1.667	1.667	2.776
ИН	1.724	2.931	3.966	1.034	0.345	2.776
ИВР	1.957	3.043	3.478	1.206	0.316	2.776
ВПР	2.500	1.667	2.500	1.667	1.667	2.776
ПАПР	0.823	2.722	4.873	0.127	1.456	2.776
ИДМ, %	2.500	2.500	1.667	1.667	1.667	2.776
CAT	1.905	3.095	2.857	1.369	0.774	2.776
ИМА	2.500	2.500	2.188	0.625	2.188	2.776
CV	2.424	2.424	0.152	4.394	0.606	2.776
Н	1.250	1.250	1.250	5.000	1.250	2.776
Кол-во значений, которые попадают в область принятия гипотезы	13	12	12	14	15	?

ционной пульсометрии. Данная длительность выбрана также в связи с направленностью работы на экспресс-диагностику сердечных заболеваний.

Результаты и их обсуждение

В таблице 3 представлены рассчитанные показатели вариационной пульсометрии двадцати здоровых людей в возрасте 60–70 лет.

Серым цветом выделены значения параметров, которые не входят в диапазон значений для здоровых людей [15, 16], а их средние значения для здоровых пациентов представлены в таблице 4, вместе с доверительными интервалами по стандартной методике для малых выборок с использованием критерия Стьюдента при доверительной вероятности равной 95%, которые также приведены в таблице 5.

В соответствии с методикой проведения дискриминантного анализа все параметры вариационной пульсометрии были проверены на «нормальность» распределения, с использованием критерия Хи-квадрат Пирсона.

Как видно из таблицы 5, первые 10 из 16 параметров имеют нормальное распределение, из которых будут отобраны показатели для дальнейшей работы. Была отобрана

Таблица 3. Значения параметров вариационной пульсометрии

Код пациента	Параметры вариационной пульсометрии															
	Mo	AMo	dRR	RRNN	SDNN	RMSSD	pNN50	ИН	ИБР	ВПП	ПАПР	ИДМ	CAT	ИМА	CV	Н
1	680	46	406	661	48	23	1.8	83	113	3.6	67	1.7	27	88	7.2	4.3
2	984	51	232	987	57	31	8.6	111	218	4.4	51	1.6	33	86	5.7	4.4
3	816	37	368	778	40	32	0.8	62	102	3.3	46	2	18	80	5.1	4.9
4	872	44	296	844	45	35	12.9	86	150	3.9	51	2.1	22	81	5.3	4.6
5	648	18	422	806	102	22	1.9	33	43	3.7	28	1.3	13	95	12.7	5.3
6	773	24	430	847	102	30	11.2	36	55	3	31	1.7	14	93	12	5.5
7	961	26	336	966	76	23	2.6	40	77	3.1	27	1.2	22	93	7.9	5.1
8	672	41	226	687	43	17	1.6	136	183	6.6	62	1.2	34	90	6.3	4.4
9	648	35	219	599	550	12	0.4	124	161	7	55	1	34	94	8.3	4.6
10	688	27	336	698	57	27	2.3	59	81	4.3	39	1.9	14	88	8.2	4.8
11	1008	32	328	973	76	32	11.3	48	97	3	32	1.7	19	89	7.8	5
12	609	33	266	681	59	17	0.5	101	124	6.2	54	1.2	27	93	8.7	4.6
13	711	29	321	656	57	20	0.4	65	92	4.4	41	1.5	20	91	8.6	4.8
14	734	33	321	766	63	20	2.5	70	102	4.2	45	1.3	25	92	8.3	4.9
15	648	43	351	653	43	16	1.1	94	121	4.4	66	1.2	35	91	6.6	4.3
16	750	46	398	795	70	33	5.5	77	115	3.4	61	2.1	22	88	8.8	4.7
17	781	40	484	800	58	40	4.5	53	83	2.6	52	2.5	16	83	7.3	4.8
18	750	49	336	779	35	24	1.3	97	146	4	65	1.5	32	83	4.5	3.9
19	680	47	250	671	44	15	0	137	187	5.9	69	1.1	41	91	6.5	4.4
20	750	45	290	761	47	27	6.1	104	155	4.6	60	1.8	26	86	6.2	4.4

Таблица 4. Средние значения параметров ВП здоровых пациентов

	Параметры вариационной пульсометрии							
	Mo	AMo	dRR	RRNN	SDNN	RMSSD	pNN50	ИН
Среднее значение	758±54	37±4	331±34	770±52	59±9	25±4	3.9±1.9	81±15
	ИБР	ВПП	ПАПР	ИДМ	CAT	ИМА	CV	Н
Среднее значение	120±21	4.3±0.6	50±6	1.6±0.2	25±4	89±2	7.6±1.0	4.7±0.2

Таблица 5. Критические и рассчитанные значения критерия Хи-квадрата Пирсона

	Параметры вариационной пульсометрии							
	Mo	RRNN	SDNN	RMSSD	ИН	ИБР	ВПП	CV
Критическое значение критерия	21.02	27.59	27.9	27.59	27.59	26.30	23.68	26.3
Рассчитанное значение критерия	11.29	25.46	18.17	14.32	22.01	8.85	11.44	18.93
	ИДМ	ИМА	AMo	dRR	pNN50	ПАПР	CAT	Н
Критическое значение критерия	16.92	26.29	27.59	23.68	27.59	27.59	26.3	15.5
Рассчитанное значение критерия	15.5	13.03	36.57	31.74	33.07	30.51	111.09	27.82

группа пациентов с заболеванием «сердечная недостаточность» 3 степени, значения параметров для больных пациентов представлены в таблице 6.

Дискриминантный анализ относится к категории методов многомерного статистического анализа, предполагающих описание объектов комплексом признаков. Высокая разрешающая способность таких методов обусловлена не только принципом «больше учтённых признаков – больше информации». Не менее важно, что эти методы учитывают систему корреляции признаков [17]. В частности, ряд показателей вариационной пульсометрии рассчитывается через одни и те же исходные величины, например, через амплитуду моды (АМо) определяются параметры ИН, ИВР, ВПР, ПАПР, САТ.

Поэтому, априорно, можно предположить, что такие показатели будут тесно связаны друг с другом, и для дальнейшего анализа целесообразно использовать только один из них. Значения соответствующих коэффициентов корреляции, характеризующих тесноту связи параметров, представлены в таблице 7.

Таблица 6. Значения параметров ВП для 10 больных пациентов

Код пациента	Параметры вариационной пульсометрии															
	Мо	АМо	dRR	RRNN	SDNN	RMSSD	pNN50	ИН	ИВР	ВПР	ПАПР	ИДМ	САТ	ИМА	CV	Н
1	797	98	62	798	13	8	0	988	1574	20.2	122	0.5	185	90	1.7	2.8
2	531	77	352	537	44	71	25.9	206	219	5.4	145	6.7	12	59	8.2	3.7
3	758	90	848	752	30	50	7.8	70	106	1.6	119	3.3	27	59	4.1	3.1
4	648	99	289	648	13	19	0.9	264	341	5.3	152	1.5	66	63	2	2.3
5	773	57	617	749	44	60	4.2	60	92	2.1	74	4.1	14	65	5.8	3.9
6	924	63	680	919	51	64	4.3	50	93	1.6	68	3.5	18	69	5.5	4.6
7	588	89	396	585	28	44	7.2	191	224	4.3	151	3.7	23	61	4.8	4
8	576	92	76	572	13	6	0	1050	1210	22.8	160	0.6	165	88	2.4	3.8
9	608	99	228	606	27	14	0.6	359	436	7.2	164	1.2	84	87	4.5	2.7
10	796	65	112	782	21	15	1	363	578	11.2	81	0.9	69	82	2.6	4.3

Таблица 7. Корреляционные связи между параметрами ВП

Параметры вариационной пульсометрии	Параметры вариационной пульсометрии									
	Мо	RRNN	SDNN	RMSSD	ИН	ИВР	ВПР	ИДМ	ИМА	CV
Мо	1.00									
RRNN	0.91	1.00								
SDNN	0.16	0.45	1.00							
RMSSD	0.62	0.64	0.18	1.00						
ИН	-0.32	-0.47	-0.71	-0.50	1.00					
ИВР	0.05	-0.12	-0.67	-0.23	0.92	1.00				
ВПР	-0.54	-0.62	-0.42	-0.76	0.82	0.62	1.00			
ИДМ	0.30	0.28	0.00	0.91	-0.41	-0.27	-0.66	1.00		
ИМА	-0.37	-0.23	0.53	-0.69	-0.03	-0.22	0.38	-0.74	1.00	
CV	-0.27	0.00	0.89	-0.11	-0.55	-0.67	-0.14	-0.14	0.71	1.00

В работе для дискриминантного анализа были отобраны параметры, у которых коэффициент корреляции не превышает по модулю значение 0.5, что соответствует слабому характеру связи [18, 19]. По этому критерию были выбраны параметры Мо, ИН, ИМА.

Отметим, что в медицинской практике для диагностики применяется такой показатель отбора, как прогностическая значимость [20]. В данной работе прогностическая значимость определяется, как доля больных пациентов, соответствующие показатели которых выходят за границы доверительного интервала параметров здоровых пациентов. Определенные таким образом показатели прогностической значимости приведены в таблице 8.

Таблица 8. Определение прогностической значимости параметров ВП

Параметр	Код пациента										Среднее значение	Прогностическая значимость
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Мо	797	531	758	648	773	924	588	576	608	796	700	0.5
Амо	98	77	91	98	57	63	89	92	99	65	83	1.0
dRR	62	352	848	289	617	680	396	76	228	112	366	0.7
SDNN	13.3	43.9	30.5	13.2	43.7	50.8	28.2	13.5	27.3	20.7	28.5	0.7
ИН	987	206	70	263	60	50	191	1051	359	364	360	0.7
ИВР	1574	219	107	342	92	93	225	1210	437	579	488	0.8
ПАПР	123	145	120	152	74	68	151	160	134	81	123	0.9
ИДМ	0.5	6.7	3.3	1.5	4.1	3.5	3.7	0.6	1.2	0.9	2.6	0.8
САТ	185	12	27	66	14	18	24	165	84	69	66	0.6
ИМА	91	59	59	63	65	68	61	88	86	82	72	0.6
CV	1.7	8.2	4.1	2.0	5.8	5.5	4.8	2.4	4.5	2.6	4.2	0.7
Н	2.8	3.7	3.1	2.3	3.9	4.6	4.0	3.8	2.7	4.3	3.5	0.6

Серым цветом выделены величины, которые выходят за диапазон значений для здоровых людей. Доля этих величин и характеризует прогностическую значимость, т.е. определяет параметры, значимо различающиеся для здоровых и больных пациентов.

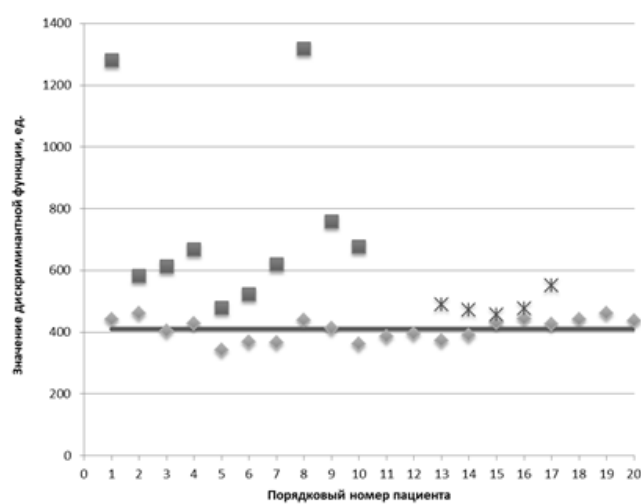
Ввиду ограниченного количества больных, прогностическая значимость определяется с шагом 0.1. Для её уточнения следует использовать большее количество пациентов для анализа.

По данным таблицы 5 можно заметить, что параметры АМо, dRR, имеют распределение, отличное от нормального. Проанализировав же данные таблицы 8, в работу были добавлены указанные параметры на основании того, что они имеют высокую прогностическую значимость и надежное различие между здоровыми и больными пациентами, а также характеризуются отсутствием сильной взаимной корреляции. Поэтому в дальнейшем они будут являться коэффициентами дискриминантной функции.

В итоге для проведения дискриминантного анализа использованы 6 параметров вариационной пульсометрии: Мо, ИН, ИМА, Амо, dRR и Н. Зная прогностическую значимость параметров, построим дискриминантную функцию следующим образом:

$$D = 1 \cdot \text{АМо} + 0.7 \cdot \text{dRR} + 0.7 \cdot \text{ИН} + 0.6 \cdot \text{ИМА} + 0.6 \cdot \text{Н} + 0.5 \cdot \text{Мо}.$$

На рисунке квадратиками показаны значения для 10 больных людей с диагнозом сердечной недостаточности 3 степени. Символ «*» соответствует значениям для пациентов



Значения дискриминантной функции для здоровых и больных пациентов с заболеваниями «сердечная недостаточность» и «аритмия».

с заболеванием «аритмия». Ромбиками отмечены показания 20 здоровых людей, среднее значение для которых, равное 410 единиц, показано прямой линией.

Значение дискриминантной функции больных людей с заболеванием сердечная недостаточность существенно превышает среднее значение для здоровых пациентов в 1.2–3.2 раза.

Как видно из рисунка, аритмия менее выражена, чем сердечная недостаточность, хотя и в этом случае проявляет заметное отличие больных от здоровых пациентов на уровне 123–135% от среднего значения.

Для выявления различий в видах патологии следует провести дискриминантный анализ, используя не только параметры вариационной пульсометрии, но и показатели других методов исследования аномалии сердечной деятельности (спектральных, гистографических, корреляционных).

Выводы

Рассчитаны значения параметров вариационной пульсометрии для 20 здоровых людей и 10 больных с заболеванием «сердечная недостаточной 3 степени».

Произведён отбор наиболее информативных показателей для дальнейшего применения в дискриминантном анализе. В качестве критериев отбора использовались следующие: проверка на нормальное распределение, корреляция между параметрами и их прогностическая значимость. В результате были выбраны 6 параметров вариационной пульсометрии: Мо, ИН, ИМА, Амо, dRR и Н.

С помощью этих показателей построена дискриминантная функция. В результате сравнения отмечено, что значения функции для здоровых и больных людей не пересекаются, что говорит о хорошей дискриминации.

При анализе дискриминантной функции отмечено, что нарушения variability сердечного ритма надежно выявляются в ходе диагностики, но для их дифференциации по виду патологии целесообразно привлечение показателей других методов, например, спектральных, корреляционных.

Таким образом, показано, что дискриминантный анализ в кардиологии может быть эффективно использован при экспресс-диагностике variability сердечного ритма.

Литература:

1. Об актуальных проблемах борьбы с сердечно-сосудистыми заболеваниями. *Аналитический вестник Совета Федерации*, сост. О.Б. Аникеева, О.В. Павленко, С.Н. Титов. 2015;44(597):78-86.
2. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации). *Вестник аритмологии*. 2001;24:65-86.
3. Рыбак О.К., Довгалецкий Я.П., Дурнова Н.Ю., Бурлака А.Н. Скрининг больных ишемической болезнью сердца с использованием многофакторного дискриминантного анализа электрокардиограммы. *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2010;6(1):76-81.
4. Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. М.: ИНФРА-М., 2007. 640 с. URL: https://doi.org/10.12737/textbook_5c4567cb83fa36.41159592
5. Пермяков С.А. Методы системного анализа амплитудно-фазового сопряжения электрокардиографической информации: дис ... канд. техн. наук. Владимир: ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2018. 159 с.
6. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1991;88:2297-2301. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.15.6506>
7. Дюк В. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях. СПб.: Питер, 2003. 528 с. ISBN 5-94723-501-3
8. Салами Х.Ф., Шлевков Н.Б., Новиков П.С., Миронов Н.Ю., Певзнер А.В. Новые электрокардиографические критерии для дифференциальной диагностики тахикардий с расширенными комплексами QRS по типу блокады левой ножки пучка Гиса. *Сибирский медицинский журнал*. 2019;34(1):98-106. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-1-98-106>
9. Коротин А.С., Посненкова О.М., Киселев А.Р., Попова Ю.В., Гряднев В.И. Стеноз коронарных артерий: всегда ли обоснована реваскуляризация? *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2019;8(1):42-51. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2019-8-1-42-51>
10. Мехдиев С.Х., Мустафаев И.И., Мамедов М.Н. Предикторы артериальной гипертензии в азербайджанской популяции у больных сахарным диабетом 2 типа. *Российский кардиологический журнал*. 2019;1:23-31. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-1-23-31>
11. Душина А.Г., Лопина Е.А., Либис Р.А. Особенности хронической сердечной недостаточности в зависимости от фракции выброса левого желудочка. *Российский кардиологический журнал*. 2019;2:7-11. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-2-7-11>
12. Лопатин Ю.М., Гребенникова А.А., Беграбекова Ю.Л. Надежность и дискриминантная валидность российской версии европейской шкалы оценки способности к самопомощи пациентов с сердечной недостаточностью. *Российский кардиологический журнал*. 2016;8:14-19. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2016-8-14-19>
13. Информационный портал: The Silver Book [Интернет-ресурс]. Режим доступа: <https://www.silverbook.org/> (Дата обращения 15.05.2019)
14. Электронная медицинская международная база данных PhysioNet.org [Интернет-ресурс]. Режим доступа: <https://physionet.org> (Дата обращения 25.04.20120)
15. Баевский Р.М. Анализ variability сердечного ритма в космической медицине. *Физиология человека*. 2002;2:70-82.
16. Ходырев Г.Н., Хлыбова С.В., Циркин В.И., Дмитриева С.Л. Методические аспекты анализа временных и спектральных показателей variability сердечного ритма (обзор литературы). *Вятский медицинский вестник*. 2011;(3-4):60-70.
17. Тюрин В.В., Щеглов С.Н. Дискриминантный анализ в биологии: монография. Краснодар: Кубанский государственный университет. 2015. 126 с.
18. Языки программирования [Интернет – ресурс]. Режим доступа: https://life-prog.ru/1_32708_otsenka-tesnotisvyazi.html (Дата обращения 14.10.2019)
19. Медицина от А до Я [Интернет – ресурс]. Режим доступа: <https://med-books.info/meditsina.html> (Дата обращения 14.10.2019)
20. Кондратьев А.И., Савилова В.В., Долгих В.Т., Лукач В.Н. Прогностическая значимость гемодинамического мониторинга у больных в остром периоде инфаркта миокарда. *Казанский медицинский журнал*. 2010;91(2):148-151.

References:

1. About actual problems of fight against cardiovascular diseases. *Analiticheskii vestnik Soveta Federatsii = Analytical Bulletin*, O.B. Anikeeva, O.V. Pavlenko, S.N. Titov (Eds.). 2015;44(597):78-86 (in Russ.).
2. Baevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V., Gavrilyushkin A.P. et al. Analysis of heart rate variability using different electrocardiographic systems (guidelines). *Vestnik aritmologii = J. Arrhythmology*. 2001;24:65-86 (in Russ.). <https://doi.org/10.14529/hsm170402>
3. Rybak O.K., Dovgalevskii Ya.P., Durnova N.Yu., Burlaka A.N. Multifactor discriminant analysis of electrocardiograms at screening patients with ischemic heart disease. *Saratovskii nauchno-meditsinskii zhurnal = Saratov J. Med. Res.* 2010;6(1):76-81 (in Russ.).

4. Kulaichev A.P. *Komp'yuternaya elektrofiziologiya i funktsional'naya diagnostika* (Computer electrophysiology and functional diagnostics). Moscow: INFRA-M.; 2007. 640 p. (in Russ.). URL: https://doi.org/10.12737/textbook_5c4567cb83fa36.41159592
5. Permyakov S.A. *Metody sistemnogo analiza amplitudno-fazovogo sopryazheniya elektrokardiograficheskoi informatsii* (Methods of system analysis of amplitude-phase coupling of electrocardiographic information). PhD Thesis. Vladimir: VIGU Publishing House; 2018. 159 p. (in Russ.).
6. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1991;88:2297-2301. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.15.6506>
7. Dyuk V. *Informatsionnye tekhnologii v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh* (Information technology in biomedical research). SPb: Piter; 2003. 528 c. ISBN 5-94723-501-3
8. Salami H.F., Shlevkov N.B., Novikov P.S., Mironov N.Yu., Pevzner A.V. New electrocardiographic criteria for differential diagnosis of tachycardias with advanced QRS complexes according to the type of blockade of left bundle of HIS. *Sibirskii meditsinskii zhurnal = Siberian Med. J.* 2019;34(1):98-10 (in Russ.). <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-1-98-106>
9. Korotin S.A., Posnenkova O.M., Kiselev A.R., Popova Y.V., Gridnev V.I. Coronary artery stenosis: is revascularization always reasonable? *Kompleksnye problemy serdechno-sosudistykh zabolevanii = Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2019;8(1):42-51 (in Russ.). <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2019-8-1-42-51>
10. Mekhdiyev S.K., Mustafaev I.I., Mamedov M.N. Predictors of arterial hypertension in patients with type 2 diabetes mellitus in azerbaijan population. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian J. Cardiology*. 2019;1:23-31 (in Russ.). <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-1-23-31>
11. Dushina A. G., Lopina E. A., Libis R. A. Features of chronic heart failure depending on the left ventricular ejection fraction. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian J. Cardiology*. 2019;2:7-11 (in Russ.). <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-2-7-11>
12. Lopatin Yu.M., Grebennikova A.A., Begrambekova Yu.L. Reliability and discriminant validity of the Russian version of European self-care behaviour scale in chronic heart failure. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian J. Cardiology*. 2016;8:14-19 (in Russ.). <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2016-8-14-19>
13. Information portal: the Silver Book [Internet resource] - access Mode: <https://www.silverbook.org/> (accessed 15.05.2019)
14. Electronic medical international database PhysioNet.org [Internet resource] - access Mode: <https://physionet.org> (accessed 25.04.2020)
15. Baevskii R.M. Analysis of heart rate variability in space medicine. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2002;2:70-82 (in Russ.).
16. Khodyrev G.N., Khlybova S.V., Tsirkin V.I., Dmitrieva S.L. Methodical aspects of analysis of temporal and spectral indices of heart rate variability (literature review). *Vyatskii meditsinskii vestnik = Medical Newsletter of Vyatka*. 2011;(3-4):60-70 (in Russ.).
17. Tyurin V.V., Shcheglov S.N. *Diskriminantnyi analiz v biologii: monografiya* (Discriminant analysis in biology: a monograph). Krasnodar: Kuban state University; 2015. 126 p. (in Russ.).
18. Programming languages [Internet resource]. access Mode: https://life-prog.ru/1_32708_otsenka-tesnotisvyazi.html (accessed 14.10.2019)
19. Medicine from A to Z [Internet resource]. access Mode: <https://med-books.info/meditsina.html> (accessed 14.10.2019)
20. Kondratiev A.I., Savilova V.V., Dolgikh V.T., Lukach V.N. Prognostic significance of hemodynamic monitoring of patients in the acute period of myocardial infarction. *Kazanskii meditsinskii zhurnal = Kazan Medical J.* 2010;92(1):148-151 (in Russ.).

Об авторах:

Силкина Ульяна Игоревна, магистр кафедры биокбернетических систем и технологий Института кибернетики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Баландин Вячеслав Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры биокбернетических систем и технологий Института кибернетики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 35857

About the authors:

Ulyana I. Silkina, Master of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Vyacheslav A. Balandin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). Author ID: 35857

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-92-103>



УДК 338.1

Проблемы и тенденции процесса наноиндустриализации в РФ

Н.В. Ломоносова¹,
Д.А. Петрусевич^{2, @}

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва 119049, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: petrusevich@mirea.ru

В представленной работе рассматриваются и анализируются ключевые особенности процесса становления и развития наноиндустрии в Российской Федерации. В качестве объекта исследования выступает наноиндустрия, как комплекс организаций, осуществляющих деятельность по созданию наукоемкой продукции наноразмерного уровня (от 1 до 100 нм) с высоким уровнем добавленной стоимости и ранее недостижимыми технико-экономическими свойствами. Предметом исследования является совокупность факторов, формирующих тенденции процесса наноиндустриализации в Российской Федерации. Основная цель данной работы заключается в проведении оценки совокупности факторов процесса наноиндустриализации при помощи методов формальной логики, индукции и дедукции, анализа имеющихся в открытом доступе статистических данных. Актуальность работы обусловлена активным развитием мирового рынка нанопродуктов, в то время как отечественная сфера наноиндустрии продолжает находиться на стадии поиска возможных путей достижения потенциально значимых результатов функционирования наукоемких производств. В работе представлен обзор современного состояния наноиндустрии в РФ, обоснованный историческим развитием нанотехнологий, и произведено сравнение отечественного рынка нанопродуктов с зарубежными лидерами. В результате проведенного SWOT-анализа выявлены сильные и слабые стороны процесса наноиндустриализации в РФ, определены возможности и угрозы его дальнейшего социально-экономического развития. Положения и выводы, представленные в статье, могут быть использованы при разработке прогнозных моделей развития наноиндустрии в кратко- средне- и долгосрочном периоде.

Ключевые слова: нанотехнологии, nanoиндустрия, стратегия развития nanoиндустрии, инновационная экономика, SWOT-анализ (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*); коммерциализация проектов, nanoэкономика.

Для цитирования: Ломоносова Н.В., Петрусеви́ч Д.А. Проблемы и тенденции процесса nanoиндустриализации в РФ. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):92-103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-92-103>

Problems and trends in the nanoindustry development in Russia

Natalia V. Lomonosova¹,
Denis A. Petrusevich^{2, @}

¹National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: petrusevich@mirea.ru

In the present paper some special features of the Russian nanoindustry are researched. The object of the research is the nanoindustry that is taken into account as a complex structure of the organisations in the Russian Federation, which develop knowledge-intensive production at the nano scale (1–100 nm) with high added value and unachievable earlier technical features and possibilities for different industries. The main theme of this paper is an observation of the set of factors, which have influence on the future of the nanoindustry in Russia. The main goal of the research is to analyze factors of the nanoindustry development in Russia by means of the methods of the formal logic, induction and deduction and by means of the analysis of the open statistical sources. The research is of immediate interest due to the quick development of the nanoproduct world market. It's quite new and includes a lot of actual scientific results. At the same time the Russian sector is still at the beginning stage of search of potentially valuable results of the knowledge-intensive productions. In the paper the modern state of Russian nanoindustry is presented and is held under investigation. It is compared to the nanoindustries in other countries. The SWOT analysis of the Russian nanoindustry development has been made. The advantages and weaknesses of the Russian nanoindustry are taken into account. The possibilities and threats to the Russian nanoindustry market are described. The conclusions of this research can be used in the long-term and short-term forecasts of the Russian nanoindustry development.

Keywords: nanotechnologies, nanoindustry, nanoindustry development strategy, innovative economy, SWOT analysis (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), commercial availability, nanoeconomy.

For citation: Lomonosova N.V., Petrusevich D.A. Problems and trends in the nanoindustry development in Russia. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(3):92-103 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-92-103>

Введение

Появление высокотехнологичной индустрии принципиально нового типа сформировало текущий этап развития мировой экономики, ознаменованный появлением рынка нанотехнологий и возникновением обширного спектра связанных с ним особенностей. Научными исследованиями в данной области в настоящее время занимаются такие отечественные авторы, как О.А. Автомонова [1], которая рассматривает nanoиндустрию

как центральное звено современной мировой экономики и основной двигатель инноваций; Г.Л. Азоев, с момента возникновения наноиндустрии в РФ исследующий данный рынок и исторические аспекты его становления; С.И. Данилов [2], поддерживающий идеи формирования наноиндустриальной экономики и анализирующий различные барьеры, возникающие на пути ее развития; Г.И. Арутюнова [3], детально рассматривающая вопросы перспектив государственной поддержки наноиндустриальных проектов; А.Ф. Лещинская [4], исследующая тенденции коммерциализации нанотехнологий в отечественной практике; О.В. Иншаков [5] и Е.И. Иншакова [6], которые занимаются стратегическим планированием региональных факторов развития наноиндустрии в РФ; Л.С. Раткин [7–8], изучающий опросы эффективности реализации инвестиционных проектов и программ в нанотехнологичной сфере; К.В. Павлов [9], анализирующий статистическую динамику развития отраслевой наноэкономики в РФ; М.И. Тронин [10], который рассматривает вопросы наноиндустриализации с точки зрения стандартизации, сертификации и контроля качества нанотехнологичной продукции и др. Среди зарубежных исследователей следует отметить таких ученых, как Burello E. [11], Steinhäuser K.G. [12], Bergeson L.L. [13] и др.

История вопроса

Промышленная революция, связанная с началом активного применения нанотехнологий в различных сферах человеческой жизни, началась в 2000-е годы. В этот период многие развитые страны, заинтересованные в трансформации национального промышленного производства, встали на путь наноиндустриализации. Однако, до того, как в 2000 году в США была поддержана Национальная инициатива в области нанотехнологий, а в РФ в 2004 году появилась «Концепция развития в РФ работ в области нанотехнологий», многие годы проводились лишь отдельные исследования, позволяющие комплексно изучать феномен нанотехнологий как таковой (успешно выявлять и исследовать инновационные материалы, обладающие характеристиками «нано» как минимум в одном из трех измерений), и проводить, хоть и достаточно обширные, но лабораторные эксперименты по получению и применению нанотехнологий. Таким образом, начиная с 2004 года, предпринимались попытки осуществить некоторые шаги в сторону формирования государственной политики в области нанотехнологий. Например, в 2006 году был издан государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 210600 – «Нанотехнология» с присвоением выпускникам квалификации «инженер»¹. Системное же развитие нанотехнологий в России и осознание термина «наноиндустрия» проходило на рубеже 2007–2008 гг., когда была основана Российская корпорация нанотехнологий (РОСНАНО). К этому времени в США и Японии, которые по сей день являются лидерами в области наноиндустрии, уже приобретало значительную популярность массовое производство ряда наноиндустриальных продуктов.

Анализ проблем и тенденций процесса наноиндустриализации в РФ

В современном понимании термин «наноиндустрия» означает межотраслевой, а также междисциплинарный комплекс организаций (организации, осуществляющие деятельность в рамках различных научных дисциплин на основе единого подхода к рассмо-

¹ Портал Федеральных государственных стандартов высшего образования. URL: <http://fgosvo.ru/fgosvo/151/150/24>

трению материи на атомно-молекулярном уровне), обеспечивающих и осуществляющих целенаправленную деятельность по разработке и коммерциализации нанотехнологий². Термин «индустрия» часто ассоциируется, а иногда и полностью приравнивается к термину «промышленность», в то же время наноиндустрия не является самостоятельной отраслью, но проявляется на всех уровнях глобальной экономики и внедряется в большинство секторов промышленного производства: металлургию, машиностроение, химическую и фармацевтическую промышленность, медицину, оптику и т.д. Об этом свидетельствует динамика среднегодового темпа роста мирового рынка наноиндустрии, которая по данным корпорации *Lux Research, Inc.* составляет порядка 15% и к концу 2020 года достигнет примерно 6 трлн. долл. США [6]. На фоне официальных мировых темпов роста наноиндустрии отечественный рынок выглядит достаточно нестабильно. Так, согласно исследованиям РОСНАНО ежегодные колебания объема продаж, объема экспорта, доли конечных потребительских товаров и выручки от реализации нанотехнологической продукции сильно видоизменяются, показывая то положительную динамику, то значительное отставание от запланированных значений. По мнению авторов, это может быть связано с поэтапной адаптацией стратегии развития наноиндустрии в РФ к условиям воздействия различных политических санкций на экономику страны. В то же время, сравнительный анализ относительного значения темпов роста индекса промышленного производства и объемов отгруженной продукции наноиндустрии (в обоих случаях за 100% принимается значение по данным на 2010 г.) позволяет наглядно представить опережающие темпы развития наноиндустрии в РФ, что графически изображено на рис. 1.

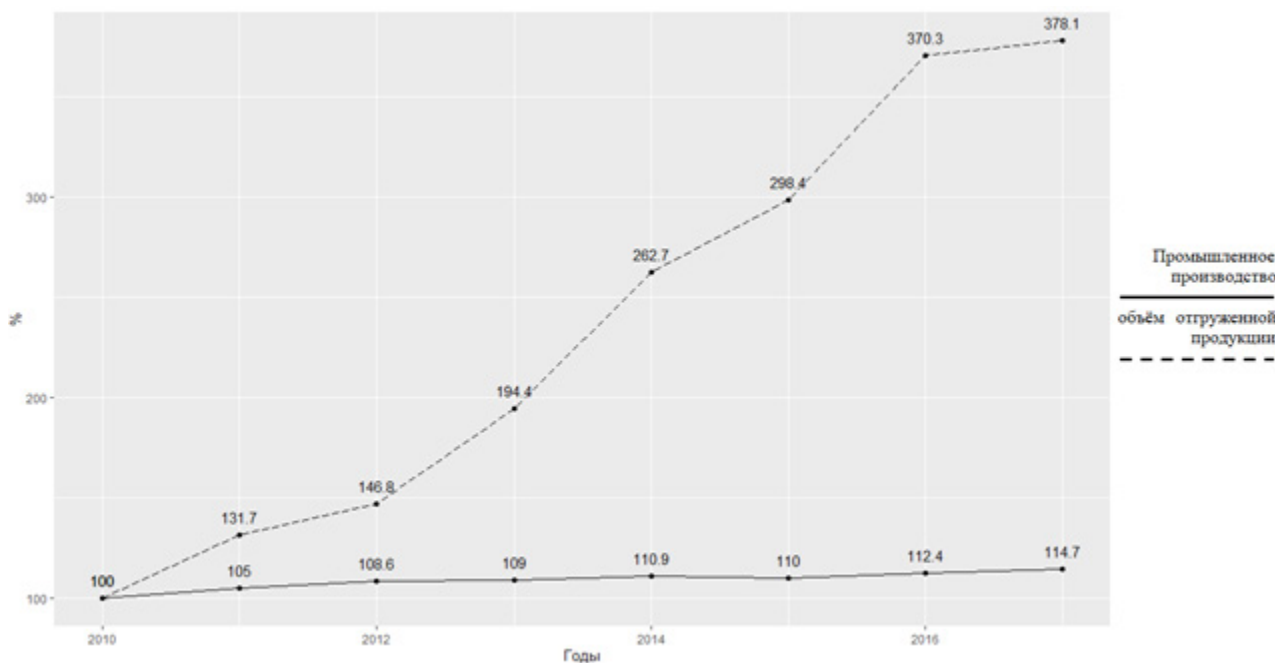


Рис. 1. Соотношение темпов роста промышленного производства и объема отгруженной продукции в РФ.

² Постановление Правительства РФ от 23.04.2010 № 282 (ред. от 28.09.2018) «О национальной нанотехнологической сети» (вместе с «Положением о национальной нанотехнологической сети»). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99942/

Одновременно с этим следует отметить, что «Программа развития наноиндустрии в Российской Федерации»³, одобренная Правительством РФ в начале 2008 года, была рассчитана на срок до 2015 года и какой-либо обновленной программы на сегодняшний день нет. Сейчас процесс развития наноиндустрии подчиняется проектам, действующим в рамках федеральных целевых программ, тематических проектов крупных научных фондов и стратегий развития, разработанных РОСНАНО. Тем не менее, развитие нанотехнологий и новых материалов определяется как одна из важнейших задач, представленных в 2014 году в рамках стратегического долгосрочного Прогноза научно-технологического развития России на период до 2030 года (ПНТР)⁴. Таким образом, совершенствование отечественной законодательной базы, с точки зрения организационных, институциональных и финансовых аспектов ее функционирования, является одним из перспективных направлений развития наноиндустрии в РФ.

Другой, не менее значимой проблемой, тормозящей развитие наноиндустрии, является то, что сами по себе нанотехнологии не формируют какой-либо отрасли мирового хозяйства, поэтому фактически «растворяются» в других сферах промышленности и несут в себе только миссию модернизации существующих секторов экономики, повышая конкурентоспособность товаров относительно их традиционных аналогов в связи с улучшением их свойств. Этим можно объяснить затруднения в области сегментирования рынка нанотехнологичной продукции, снижение мировых темпов роста наноиндустрии в последние годы и критический разброс плановых показателей объемов данного рынка как в РФ, так и в мире. Дело в том, что первая применяемая методика сводится к расчету объема рынка наноиндустрии, как суммарному значению стоимости готовых изделий, при производстве которых были использованы наноматериалы. При таком подходе приходится учитывать, например, стоимость самолета, в некоторых деталях которого были использованы нанопорошки гафния [14]. Вторая методика подразумевает исключительно расчет стоимости нанодисперсных материалов (в представленном выше примере – только нанопорошков гафния). Очевидно, что объемы рынка наноиндустрии, определенные двумя представленными способами, будут отличаться в десятки и сотни раз. В целях совершенствования подхода к расчету текущих и прогнозируемых объемов рынка наноиндустрии условно принято делить продукцию наноиндустрии на несколько категорий:

«Категория А» – первичная нанотехнологичная продукция (наночастицы, нанопористые материалы, нанопорошки и пр.);

«Категория Б» – наносодержащая продукция, нанопосредники, наноинтермедиаты, (покрытия, ткани, волокна, чипы, оптические компоненты и пр.);

«Категория В» – товары/услуги, при производстве/оказании которых используются нанотехнологии/нанокомпоненты (электроника, фармацевтика, автомобилестроение продукты питания и пр.);

«Категория Г» – специальное оборудование для нанотехнологий, наноинструменты (микроскопы, оборудование для литографической печати и пр.)⁵.

³ Программа развития наноиндустрии в Российской Федерации до 2015 года (одобрено Правительством РФ 17.01.2008). URL: [https://rulaws.ru/acts/Programma-razvitiya-nanoindustrii-v-Rossiyskoy-Federatsii-do-2015-goda-\(odobreno-Pravitelstvom-RF-17/](https://rulaws.ru/acts/Programma-razvitiya-nanoindustrii-v-Rossiyskoy-Federatsii-do-2015-goda-(odobreno-Pravitelstvom-RF-17/)

⁴ Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Правительством РФ 3 января 2014 г.). URL: <http://static.government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf>

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 7 июля 2011 г. №1192-р «Об утверждении категорий продукции наноиндустрии в части товаров и услуг» <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55071699/>

Наглядный пример, демонстрирующий сильную разницу между объемами отгруженной продукции наноиндустрии по перечисленным выше категориям, представлен на рис. 2.

На представленном на рисунке 2 графике видно, что наилучшую динамику демонстрирует продукция «Категории Б», то есть наносодержащая продукция, имеющая в своем составе нанопродукцию «Категории А».

Тем не менее, такая обобщенная идеология разделения нанопродукции по категориям практически всегда требует дополнительного уточнения при классификации конкретного нанообъекта, что на текущем этапе развития наноиндустрии в РФ может быть достигнуто только разработкой локальных нормативно-правовых актов ведомств и заинтересованных участников рыночных отношений. А эта проблема вновь связана с отсутствием стандартизации и единства подходов к определению конечных объемов рынка. Обе описанные выше проблемы в совокупности с неоднозначностью подходов к сертификации и контролю качества нанотехнологичных продуктов и производств влекут за собой еще один фактор, влияющий на активность процесса наноиндустриализации – отсутствие стандартизации экономико-статистических расчетов объема рынка нанотехнологий. Данная особенность значительно усложняет сбор, систематизацию и проведение аналитических исследований в области наноиндустрии и связана, в первую очередь, с тем, что в различные отчеты и реестры теоретически могут попадать товары, которые строго не соответствуют заявленным критериям наноиндустрии. Так, многие популярные мировые экономико-статистические реестры наноиндустрии (например, Британская Ассоциация нано-

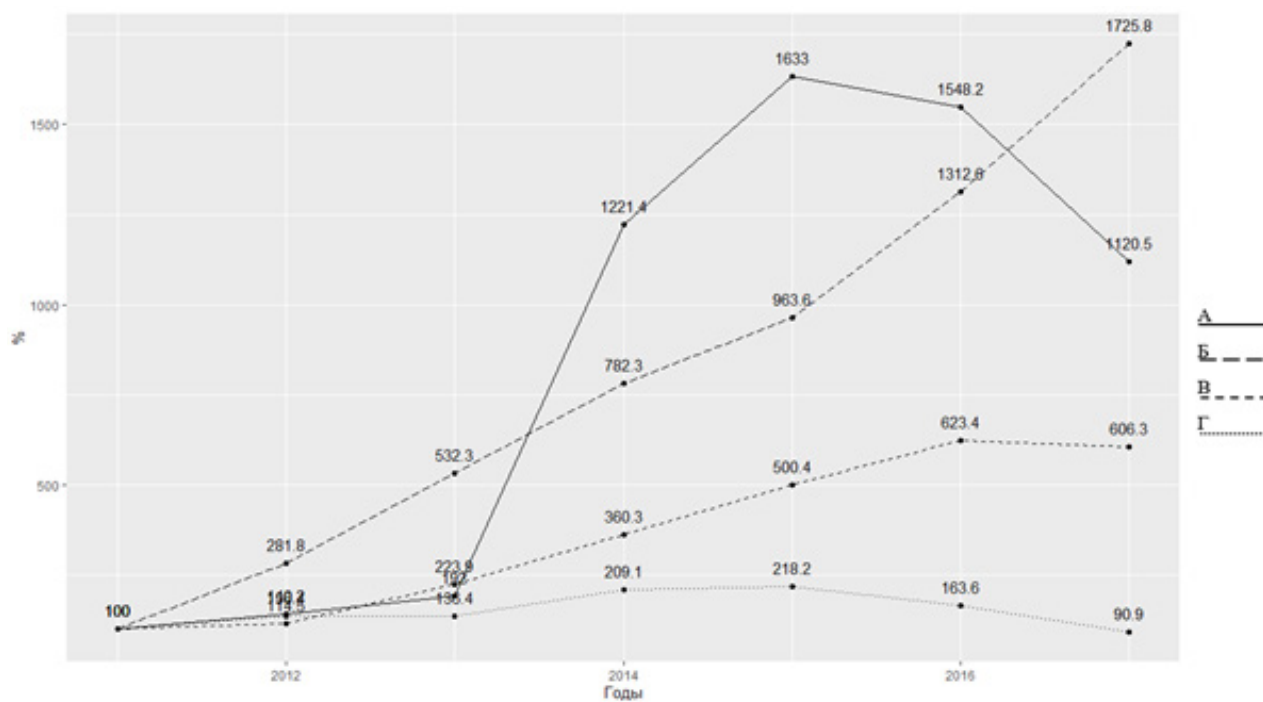


Рис. 2. Темпы роста отгруженной продукции по категориям, в % (относительно 2011 г.).

технологических отраслей промышленности «*Nanotechnology Industries Association*» NIA⁶, Датская аналитическая компания *Nanodatabase*⁷, База данных «*The Nanowerk Nanomaterial Database*») позволяют обычным пользователям реестров участвовать в расширении и совершенствовании баз данных на сравнительно упрощенных условиях.

Следующая проблема, определяющая тенденции процесса наноиндустриализации в РФ, связана с территориальной неоднородностью дислокации нанотехнологичных производств и объясняется в первую очередь, региональной децентрализацией РФ как таковой. Преимуществом РФ в данном случае является возможность такого географического расположения конкретных производственных объектов сферы наноиндустрии, которое обеспечит максимально комфортные условия для их функционирования (климатические условия, экологические условия, близость к источникам полезных ископаемых или иных материалов, требующихся для сокращения затрат на логистику и т.д.)

Не менее важное значение имеет вопрос отставания темпов коммерциализации наноразработок в РФ от мировых лидеров (США, Япония, Южная Корея, страны Евросоюза) в среднем на 5–7 лет. На сегодняшний день в рейтинге Индекса конкурентоспособности национальных инновационных систем РФ, наравне с Канадой и Австралией, находится на 42 месте среди 50 стран, в тоже время, по показателям, характеризующим объем инвестиций в наноиндустрию, отечественная экономика не слишком сильно отстает от лидера – США. По мнению авторов, такой диссонанс вызван рассредоточением сравнительно крупных объемов инвестиций в отечественные наноиндустриальные проекты и сопутствующее ему условное отсутствие концентрации ресурсов и производства. Так, в Японии наноиндустрия ориентирована на робототехнику, в США – на авиационную промышленность и военную технику, в Германии нанотехнологии используют преимущественно в автомобилестроении [12] и т.д. Стремление отечественных инвесторов вкладывать капитал во всевозможные отрасли в небольших размерах, диверсифицируя при этом собственные риски, приводит к отсутствию целевого характера капиталовложений и неэффективности финансирования нанотехнологий как такового.

Следующей социально-экономической проблемой являются сложности, связанные с прямым и венчурным инвестированием нанотехнологичных проектов и дефицитом венчурных фондов в РФ. С учетом большой капиталоемкости сферы разработки и коммерциализации нанотехнологий, основной акцент в инвестициях делается на установление четкой взаимосвязи и интеграции всех потенциальных участников «цепочки» формирования добавленной стоимости в данной области, а также на создание сетевых структур кластерного типа (технологических платформ, национальных нанотехнологических сетей и др.). В большинстве случаев для инвестирования в нанотехнологичные производства требуется сравнительно большие суммы денег, в то время как период их окупаемости может превышать нормы. Тем не менее, официальные данные РОСНАНО [8] свидетельствуют о том, что за период 2015–2018 гг. были созданы шесть инвестиционных фондов, предназначенных для работы с нанотехнологичными проектами. Прогнозный объем денежных средств, который станет возможно привлечь в сферу наноиндустрии к 2023 году при помощи данных фондов, составляет от 170 до 225 млрд. руб. Подобная положительная перспектива

⁶ Британская Ассоциация нанотехнологических отраслей промышленности *Nanotechnology Industries Association*. <https://nanotechia.org/>

⁷ Датская аналитическая компания *Nanodatabase*. <https://nano.nature.com/>

может быть омрачена фактом наличия критической олигополии инвестиционных корпораций, специализирующихся на вложениях в нанотехнологичные производства.

Кроме этого, инвестиционную активность в сфере наноиндустрии ограничивают такие факты, относящиеся к подавляющему большинству наукоемких отраслей, как высокие издержки на этапах проведения НИОКР, разработки, внедрения и коммерциализации нанотехнологичной продукции; а также значительные временные затраты бизнес-процесса «от разработки – до внедрения и продаж» [15]. Высокая наукоемкость нанотехнологий также обуславливает открытие широких перспектив разработки инновационных, пользующихся спросом товаров со значительной доходностью и капиталоотдачей, но одновременно с этим влечет за собой непрогнозируемые риски, возникающие в процессе проведения исследований.

Вопрос текущего и прогнозируемого масштаба интегрированности отечественного сектора наноиндустрии в глобальную международную систему наноиндустрии имеет отдельное макроэкономическое значение. На сегодняшний день число предприятий, производящих и реализующих нанотехнологичную продукцию на территорию РФ, составляет порядка 560 (для сравнения, всего в мире более 16 тыс. таких компаний), а объем отгруженных ими товаров – 5284.9 млрд. руб. Из них денежный эквивалент поставляемой на экспорт (в основном, в страны СНГ и Западной Европы) продукции составляет лишь 336.4 млрд. руб, т.е. примерно 6.37% [16]. Доля нанотехнологичных товаров, реализуемых на мировом рынке, относительно совокупных мировых объемов товаров наноиндустрии составляет порядка 4%, хотя и имеет ежегодную тенденцию к возрастанию. Что касается товарной структуры экспорта наноиндустрии, то здесь доминируют такие производственные сферы, как металлургия, машиностроение и химическая промышленность. Чуть меньшая часть экспортируемых нанотехнологичных товаров приходится на энергетику и телекоммуникации. Следует отметить, что большинство экспортируемой продукции относится к «Категории В», то есть, категории товаров и услуг, при производстве которых используются нанокomпоненты. В данном случае фактором, сдерживающим экспортную деятельность и ограничивающим внешние рынки сбыта РФ в сфере наноиндустрии, могут быть не только политические и экономические санкции, сопровождающиеся отказом зарубежных партнеров от сделок и совместных проектов с отечественными фирмами, но и проблемы недостаточного развития международного маркетинга российской продукции, произведенной с использованием нанотехнологий, а также недостаток научной взаимосвязи между российскими и зарубежными исследователями. В целом, развитие наноиндустрии РФ за счет экспортного потенциала в среднесрочной перспективе можно считать маловероятным.

Широкие перспективы для сферы наноиндустрии открывает глобальное видоизменение рынка труда. Противоречие, возникающее в связи с появлением большого количества новых рабочих мест для кадров, имеющих высокую квалификацию, с одной стороны, и вытеснением специалистов, работающих в области производства традиционных аналогов нанотехнологичной продукции, с другой стороны, обуславливает несколько особенностей. Во-первых, неизбежно образуется сектор структурной стимулирующей безработицы, при которой требуется переобучение сотрудников навыкам работы с наноструктурными материалами. Очевидно, что это должно спровоцировать спрос на программы повышения

квалификации и профессиональной переподготовки кадров. Во-вторых, происходит трансформация требований к сотрудникам, изменение профстандартов ряда профессий, наиболее свойственных для наноиндустриальных производств. В-третьих, возникают серьезные изменения в сфере высшего образования, касающиеся программ подготовки кадров требуемой квалификации, в том числе увеличение числа образовательных организаций высшего образования, реализующих направления подготовки, ориентированные на развитие наноиндустрии (по официальной статистике в РФ насчитывается порядка 40 образовательных организаций высшего образования, обучающих специалистов в области нанотехнологий или направлений подготовки, тесно связанных с ними, и около 200 образовательных программ [17]). В-четвертых, уже сегодня по численности работников, занятых в сфере наукоемких производств, РФ занимает 15-ю позицию в мировом рейтинге [18], что в совокупности с достаточно высокой публикационной активностью, регистрацией патентов и изобретений исследователей в области наноиндустрии, дает основания положительно характеризовать динамику развития человеческого капитала для наноиндустрии.

Для выявления проблемных полей, перспектив и возможных последствий наноиндустриализации РФ был проведен SWOT-анализ (таблица), позволяющий систематизировать перечисленные выше сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы, характерные для современного состояния наноиндустрии.

Выводы

Несмотря на проблемы и риски, препятствующие интенсивному развитию наноиндустрии в РФ, интерес к производству нанотехнологичной продукции продолжает расти. Социально-экономический интерес вызывают в большей степени конечные продукты с улучшенными свойствами, полученные при помощи нанотехнологий, чем инновационные товары, аналогов которым не существует. При проведении оценки совокупности макроэкономических перспектив и последствий процесса наноиндустриализации обнаружено, что среди ключевых особенностей текущего процесса следует выделять такие факторы, как:

- научная заинтересованность исследователей данной проблемой;
- специфические исторические особенности развития наноиндустрии в РФ;
- отсутствие отраслевой принадлежности наноиндустрии к какому-либо единому сектору промышленности;
- нестабильность развития отечественного рынка наноиндустрии по сравнению с динамикой развития рынков стран-лидеров;
- сложности, связанные со стандартизацией и сертификацией наноиндустриальной продукции;
- децентрализация наноиндустриальных предприятий на территории РФ;
- ряд социально-экономических, финансовых и инвестиционных особенностей, а также особенностей, связанных с развитием рынка труда и кадрового обеспечения наноиндустрии.

Каждый из причисленных ключевых факторов процесса наноиндустриализации РФ имеет как положительное, так и отрицательное влияние на развитие нанотехнологий, и нуждается в детальном анализе, который может служить предметом дальнейших исследований.

SWOT-анализ процесса наноиндустриализации РФ

Сильные стороны (Strengths)	Слабые стороны (Weaknesses)
– Высокий интеллектуальный научно-исследовательский потенциал; – Значительный объем фундаментальных наукоёмких разработок в области нанотехнологий; – Масштабная государственная поддержка развития наноиндустрии; – Поэтапное развитие сети инвестиционных венчурных фондов; – Увеличение конкурентоспособности товаров, обладающих новыми свойствами, относительно их крупнодисперсных аналогов; – Расширение спроса на рынке труда высококвалифицированных кадров; – Совершенствование системы высшего и послевузовского образования, ориентированное(го) на подготовку специалистов сферы наноиндустрии; – Институциональное обновление экономики.	– Низкий уровень коммерциализации разработок; – Отсутствие системы прикладного использования фундаментальных разработок; – Слабая заинтересованность в развитии наноиндустрии со стороны частного сектора; – Отставание показателей наноиндустрии РФ от аналогичных показателей стран-лидеров (США, Япония, ЕС); – Отсутствие единства подходов к стандартизации, сертификации и контролю качества нанотехнологичных продуктов и производств; – Трансформация квалификационных требований к персоналу; – Необходимость проведения переподготовки части кадрового пула; – Ограничения, связанные с экологией и природоохранными нормами.
Возможности (Opportunities)	Угрозы (Threats)
– Совершенствование защиты интересов разработчиков, производителей и потребителей нанопродукции; – Распределение нанотехнологичных производств по обширной территории РФ в соответствии с конкретными производственными требованиями; – Образование наноиндустриальных производств на базе исследовательских институтов; – Повышение взаимодействия между академическим и частным секторами для обеспечения софинансирования НИОКР; – Создание центров трансфера технологий; – Создание инновационных наноматериалов и продуктов с улучшенными свойствами; – Повышение уровня жизни населения за счет расширения спектра производства наноиндустриальной продукции; – Перспективы, связанные с высокой рентабельностью нанотехнологичных производств.	– Несовершенство законодательной базы в сфере наноиндустрии; – Децентрализация законодательства в области наноиндустрии по региональному принципу; – Олигополия инвестиционных корпораций, специализирующихся на вложениях в нанотехнологичные производства; – Риски, связанные с наукоёмкостью наноиндустриальных разработок; – Риски, связанные с отсутствием системного планирования и координации разработок НИОКР; – Опасность непредвиденного («случайного») создания неприемлемых с точки зрения социума или экологии нанопродуктов; – Значительные временные затраты «от разработки до внедрения и продаж»; – Риски, связанные с отсутствием рентабельности нанотехнологичных производств.

Литература:

1. Автомонова О.А. Наноиндустрия как ядро инновационного развития глобальной экономики. *Вестник Волгоградского государственного университета. Секция 3: Экономика. Экология*. 2012;1(20):151-155.
2. Данилов С.И. Наноиндустрия: через объединение к самоорганизации. *Инициативы XXI века*. 2013;4:105-106.
3. Арутюнова Г.И. Наноиндустрия – фактор экономического роста? Инновационное развитие науки и образования. Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Пенза, 2018. С. 235-238.
4. Лещинская А.Ф., Черникова А.А., Ломоносова Н.В. Проблемы коммерциализации инновационных продуктов в условиях развития наноиндустрии. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2015;2:80-87.
5. Inshakov O.V. Inshakova E.I. World market for nanomaterials: structure and trends. *MATEC Web Conf*. 2017;129:02013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712902013>
6. Иншакова Е.И. Направления коррекции стратегии развития наноиндустрии в регионах России с учетом негативного влияния внешней среды. *Региональная экономика. Юг России*. 2018;3(21):4-15. <https://doi.org/10.15688/re.volsu.2018.3.1>

7. Раткин Л.С. «Наноиндустрия 4.0» и стратегические информационные технологии на примере «системного инжиниринга» при разработке суперкомпьютерных вычислительных систем. *Инвестиции в России*. 2017;9(272):45-48.
8. Раткин Л.С. Состояние и перспективы развития наноиндустрии в Российской Федерации. *Наноиндустрия*. 2018;7-8(86):520-524. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.7-8.520.524>
9. Павлов К.В. Статистическое измерение развития наноэкономики. *Бизнес Информ* (Бизнес информ). 2015;1:111-116. URL: http://nbuv.dov.ua/UJRN/binf_2015_1_18
10. Тронин М.И. Поддержка производства нанопроизводства средствами менеджмента качества. *Вестник науки и образования*. 2018;5(41):52-54.
11. Burello E. Review of (Q)SAR models for regulatory assessment of nanomaterials risks. *NanolImpact*. 2017;8:48-58. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.07.002>
12. Steinhäuser K.G., Sayre P.G. Reliability of methods and data for regulatory assessment of nanomaterial risks. *NanolImpact*. 2017;7:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.06.001>
13. Bergeson L.L., Hutton C.N. FDA's final and draft nanotechnology guidance documents: No big surprises. *Nanotechnology Law & Business*. 2015;12(1):54-58.
14. Шилов О.В., Ломоносова Н.В. Коммерциализация инновационной технологии производства наногафния. *Цветные металлы*. 2014;5(857):7-10.
15. Frolov D.P., Popkova E.G., Stratulat I.V., Shulimova A.A. Complex Management of Promising Technologies: A Case Study of Russian Nano-Industry. *Nanotechnology Law & Business*. 2015;12(2):148-160.
16. Наноиндустрия России. Статистический справочник 2011-2018, под ред А.Г. Свиначенко. М., 2018. 48 с. URL: <https://www.rusnano.com/upload/images/infrastructure/Справочник%20Наноиндустрия%20России%202011-2018.pdf>
17. Сидоров С.Г. Подготовка кадров для наноиндустрии в России. *Вестник Волгоградского государственного университета*. 2015;1(30):91-102. <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu3.2015.1.9>
18. Рогова В.А. Кадровые проблемы развития высоких технологий в России в зеркале глобального индекса инноваций. *Российский технологический журнал*. 2018;6(4):105-116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-105-116>

References:

1. Avtonomova O.A. Nanoindustry as a core of the global economy innovation-based development. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Sektsiya 3: Ekonomika. Ekologiya = Science Journal of VolSU. Global Economic System*. 2012;1(20):151-155 (in Russ.).
2. Danilov S.I. Nanoindustry: through union to self-organization. *Initiativy XXI veka = Initiatives of the XXI century*. 2013;4:105-106 (in Russ.).
3. Arutyunova G.I. Is nanoindustry a factor of the economic growth? In: Innovative development of the science and education. *Collected papers of the International scientific conference*. In 2 v. Penza; 2018. P. 235-238 (in Russ.)
4. Leshchinskaya A.F., Chernikova A.A., Lomonosova N.V. Problems of commercialization of innovative products under conditions of nanotechnology development. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya = Problems of ferrous metallurgy and material science*. 2015;2:80-87 (in Russ.).
5. Inshakov O.V. Inshakova E.I. World market for nanomaterials: structure and trends. *MATEC Web Conf*. 2017;129:02013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712902013>
6. Inshakova E.I. Directions of correction of the strategy of nanoindustry development in the regions of Russia under the negative impact of the external environment. *Regional'naya ekonomika. Yug Rossii = Regional Economy. South of Russia*. 2018;3:4-15 (in Russ.). <https://doi.org/10.15688/re.volsu.2018.3.1>
7. Ratkin L.S. "Nanoindustry 4.0" and strategic informational technologies on the example of "system engineering" for the development of the supercomputing calculating systems. *Investitsii v Rossii = Investments in Russia*. 2017;9(272):45-48 (in Russ.).
8. Ratkin L.S. The state and prospects of development of nanoindustry in the Russian Federation. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2018;7-8(86):520-524 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.7-8.520.524>
9. Pavlov K.V. Statistical measuring of the nanoeconomics development. *Бизнес Информ = Business inform*. 2015;1:111-116 (in Russ.) URL: http://nbuv.dov.ua/UJRN/binf_2015_1_18
10. Tronin M.I. Support of production of nanoproduction by means of quality management. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of science and education*. 2018;5(41):52-54 (in Russ.).
11. Burello E. Review of (Q)SAR models for regulatory assessment of nanomaterials risks. *NanolImpact*. 2017;8:48-58. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.07.002>
12. Steinhäuser K.G., Sayre P.G. Reliability of methods and data for regulatory assessment of nanomaterial risks. *NanolImpact*. 2017;7:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.06.001>
13. Bergeson L.L., Hutton C.N. FDA's final and draft nanotechnology guidance documents: No big surprises. *Nanotechnology Law and Business*. 2015;12(1):54-58.
14. Shilov O.V., Lomonosova N.V. Commercial of innovative technology of nanohafnium production. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*. 2014;5(857):7-10 (in Russ.).

15. Frolov D.P., Popkova E.G., Stratulat I.V., Shulimova A.A. Complex Management of Promising Technologies: A Case Study of Russian Nano-Industry. *Nanotechnology Law & Business*. 2015;12(2):148-160.
16. *Nanoindustriya Rossii. Statisticheskii spravochnik 2011-2018* (Nanoindustry of Russia. Statistical handbook 2011-2018), A.G. Svinarenko (Ed). Moscow; 2018. 48 p. (in Russ.). URL: <https://www.rusnano.com/upload/images/infrastructure/Справочник%20Наноиндустрия%20России%202011-2018.pdf>
17. Sidorov S.G. Education of the personnel for nanoindustry in Russian Federation. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika = J. VolgSU. Economics*. 2015;30(1):91-102 (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu3.2015.1.9>
18. Rogova V.A. Problem of staffing for development of high technologies in Russia in the mirror of the global innovation index. *Rossiiskii tekhnogicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(4):105-116 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-105-116>

Об авторах

Ломоносова Наталья Владимировна, кандидат педагогических наук, заместитель начальника отдела образовательных информационных технологий, ассистент кафедры экономики Института экономики и управления промышленными предприятиями Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4). <https://orcid.org/0000-0002-0225-2880>, Scopus Author ID: 56227083200. lomonosova.nv@misis.ru, natvl@list.ru

Петрусевиц Денис Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>, Scopus Author ID: 55900513600, Web of Science ResearcherID: AAA-6661-2020. petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

About the authors

Natalia V. Lomonosova, Cand. Sci. (Pedagogical Sciences), Deputy Head of the Department of Educational Information Technologies, of National University of Science and Technology “MISIS”, assistant professor of the Department of Economics, National University of Science and Technology “MISIS” (4, Leninskiy pr. Moscow, 119049, Russia). ORCID:0000-0002-0225-2880, Scopus Author ID: 56227083200. lomonosova.nv@misis.ru, natvl@list.ru

Denis A. Petrusevich, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Higher Mathematics Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>, Scopus Author ID: 55900513600, Web of Science ResearcherID: AAA-6661-2020. petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 29 мая 2020 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj-mirea.ru>

