

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

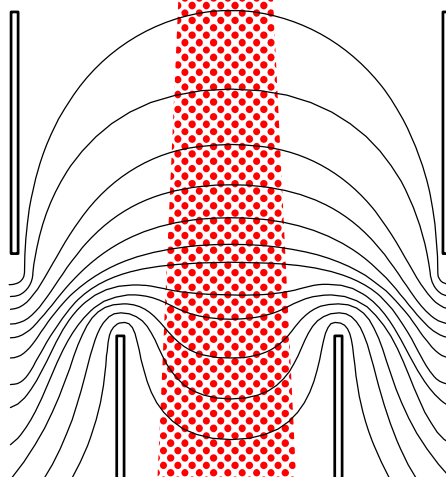
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПРИБОРО**С**ТРОЕНИЕ
НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **11**

Т. 65
2022

Journal of **I**nstrument **E**ngineering



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЪЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО „Феррум“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ „Авангард“», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО

Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@itmo.ru

[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 30.11.2022 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А

Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале.

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 (при составлении списка преимущество следует отдавать изданиям, включенным в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

Новые требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@itmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы: информационные технологии и системы, приборы и системы автоматического управления, вычислительная техника, приборы навигации, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, оптические и оптико-электронные приборы и системы, акустические приборы и системы, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, приборы, системы и изделия медицинского назначения, технология приборостроения, научные и практические разработки. По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@itmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, межстрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). **Не вставлять** формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т.д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

Под редакцией доктора технических наук, профессора Б. В. Соколова

МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

- Охтилев М. Ю., Охтилев П. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов 781
- Зеленцов В. А., Ковалев А. П. Оценивание эксплуатационных затрат при расчете совокупной стоимости владения распределенными техническими комплексами 789
- Микони С. В. Системный анализ моделей классификации и упорядочения объектов ... 796
- Павлов А. Н., Умаров А. Б., Павлов Д. А., Гордеев А. В. Планирование реконфигурации многорежимных сложных объектов 802
- Кимяев И. Т., Спесивцев А. В. Нечетко-возможностный подход к управлению сложностью интегрированных информационно-управляющих систем 813
- Семенов А. И., Кулаков А. Ю. Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов 818

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

- Кулешов С. В., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю. Формирование ядра документов в системах интернет-мониторинга в условиях ресурсных ограничений 826
- Левшун Д. А. Модель комбинированного применения интеллектуальных методов корреляции событий информационной безопасности 833
- Летенков М. А., Яковлев Р. Н., Маркитантов М. В., Рюмин Д. А., Карпов А. А. Применение методов синтеза обучающих данных для распознавания частично скрытых лиц на изображениях 842

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLET OV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., Research Institute of Optoelectronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

NOVEMBER 2022

№ 11

CONTENTS

By Edition of B. V. Sokolov, Doctor of Technical Sciences, Professor

METHODOLOGY AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX OBJECTS CONTROL

- Okhtilev M. Yu., Okhtilev P. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M.** Methodological and Methodical Principles of Proactive Life Cycle Management of Complex Technical Objects.....781
- Zelentsov V. A., Kovalev A. P.** Estimation of Operating Costs when Calculating the Total Cost of Ownership of Distributed Technical Complexes.....789
- Mikoni S. V.** System Analysis of Classification and Ordering Models of Objects796
- Pavlov A. N., Umarov A. B., Pavlov D. A., Gordeev A. V.** Planning the Reconfiguration of Multi-Mode Complex Objects802
- Kimyaev I. T., Spesivtsev A. V.** Fuzzy-Possibilistic Approach to Managing the Complexity of Integrated Information and Control Systems813
- Semyonov A. I., Kulakov A. Yu.** Model and Algorithmic Support for Forecasting and Planning the Forage Harvesting Process818

MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUPPORT OF INFORMATION SYSTEMS

- Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. Yu.** Formation of the Core of Documents in Internet Monitoring Systems Under Resource Constraints826
- Levshun D. A.** Model of Combined Application of Intelligent Methods of Information Security Events Correlation.....833
- Letenkov M. A., Iakovlev R. N., Markitantov M. V., Ryumin D. A., Karpov A. A.** Application of Training Data Synthesis Methods for Recognition of Partially Hidden Faces in Images.....842

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

Уважаемые читатели!

19 декабря 2022 года отмечает 45 лет со дня образования Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), входящий в состав СПбФИЦ РАН. Этой знаменательной дате посвящены статьи, включенные в настоящий выпуск журнала. Содержание большинства статей связано с постановкой и решением одной из главных проблем, с которой столкнулось человечество на рубеже XX и XXI веков, а именно проблемой сложности окружающего нас мира и искусственных объектов (артефактов), создаваемых и повсеместно используемых в ходе научно-технической революции. В Российской Федерации из-за постоянных санкций зарубежных государств в отношении наукоемких сфер отечественной экономики (в том числе, и в области ее цифровой трансформации) решение проблемы сложности, в первую очередь, направлено на поиск эффективных путей перехода к импортозамещению, а в перспективе и к импортоопережению в указанных сферах.

В статьях, представленных в настоящем выпуске, предлагаются оригинальные теоретические и практические результаты, направленные на решение рассматриваемой проблемы сложности. Данные результаты базируются на методологических и методических разработках, выполненных научными сотрудниками, инженерами и аспирантами СПИИРАН в течение нескольких последних лет и тематически связанных с решением различных классов задач анализа и синтеза перспективных интеллектуальных информационных технологий и систем.

*Главный научный сотрудник СПИИРАН,
доктор технических наук, профессор
Б. В. СОКОЛОВ*

To the Readers!

On December 19, 2022, the St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), which is part of the SPbFRC RAS, celebrates 45 years since its foundation. The articles included in this issue of the journal are dedicated to this significant date. The content of most of the articles is related to formulation and solution of one of the main problems faced by mankind at the turn of the XX and XXI centuries, namely, the problem of the complexity of the world around us and artificial objects (artifacts) created and widely used during the scientific and technological revolution. In the Russian Federation, due to the constant sanctions of foreign states in relation to knowledge-intensive areas of the domestic economy (including the field of its digital transformation), the solution to the problem of complexity, first of all, is aimed at finding effective ways to transition to import substitution, and in the long term and to import advance in these areas.

The articles presented in this issue offer original theoretical and practical results aimed at solving the considered problems of complexity. These results are based on methodological and methodical developments carried out by researchers, engineers and graduate students of SPIIRAS over the past few years and thematically related to the solution of various classes of problems of analysis and synthesis of promising intelligent information technologies and systems.

BORIS V. SOKOLOV
Dr. Sci., Professor
Chief Researcher of the SPIIRAS

МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

METHODOLOGY AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX OBJECTS CONTROL

УДК 519.4

DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

М. Ю. ОХТИЛЕВ, П. А. ОХТИЛЕВ, Б. В. СОКОЛОВ*, Р. М. ЮСУПОВ

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

**sokolov_boris@inbox.ru*

Аннотация. Рассматриваются методологические и методические основы, использованные при создании отечественной информационно-аналитической платформы и соответствующих информационных систем. Указанная методология базируется на двух новых прикладных теориях: теории проактивного (упреждающего) управления жизненным циклом сложных технических объектов, а также дополняющей ее теории многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов, описывающих функционирование сложных технических объектов и соответствующих информационно-аналитических систем. Последняя теория названа авторами квалиметрией моделей и полимодельных комплексов. Данные две теории вносят существенный вклад в развитие современной информатики: благодаря теории проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов современная информатика на конструктивном уровне обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике (обобщенной теории управления); благодаря разработанной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов в информатике появился новый математический аппарат, позволяющий повысить обоснованность и качество проектных решений по созданию программно-математического обеспечения информационных систем, снизить стоимость их проектирования и эксплуатации. Приведены краткие сведения о практической реализации разработанных теорий.

Ключевые слова: *информационно-аналитическая платформа, информационно-аналитическая система, проактивное управление, квалиметрия моделей и полимодельных комплексов, киберфизические системы, жизненный цикл системы, сложные технические объекты*

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Ссылка для цитирования: *Охтилев М. Ю., Охтилев П. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 781—788. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788.*

METHODOLOGICAL AND METHODICAL PRINCIPLES OF PROACTIVE LIFE CYCLE MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

M. Yu. Okhtilev, P. A. Okhtilev, B. V. Sokolov*, R. M. Yusupov

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,

St. Petersburg, Russia

**sokolov_boris@inbox.ru*

Abstract. Basic methodological and methodical principles used in the creation of the domestic information and analytical platform and corresponding information systems are considered. This methodology is based on application of two novel theories: the theory of proactive (anticipatory) life cycle management of complex technical objects, as well as its complementary theory of multi-criteria evaluation and selection of the most preferred models and polymodel complexes describing the functioning of complex technical objects and corresponding information and analytical systems. The latter theory is called by the authors the qualimetry of models and polymodel complexes. These two theories make a significant contribution to the development of modern computer science: thanks to the theory of proactive life cycle management of complex technical objects, modern computer science is enriched at a constructive level with methods and methodological support developed in the frames of classical cybernetics (generalized control theory); thanks to the developed qualimetry of models and polymodel complexes, a new mathematical apparatus has appeared in computer science, which makes it possible to increase the validity and quality of design solutions in creation of software and mathematical support for information systems, reduce the cost of their design and operation. Brief information about the practical implementation of the developed theories is presented.

Keywords: information and analytical platform, information and analytical system, proactive control, qualimetry of models and polymodel complexes, cyber-physical systems, system life cycle, complex technical objects

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 22-19-00767.

For citation: Okhtilev M. Yu., Okhtilev P. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Methodological and methodical principles of proactive life cycle management of complex technical objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 781—788 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788.

Введение. В настоящее время в условиях усиливающегося санкционного давления в наукоемких отраслях отечественной экономики, к числу которых относится и сфера информационно-аналитических управляющих систем, особую значимость приобретают поставленные Президентом РФ и Правительством РФ цель и задачи по разработке и реализации отечественной стратегической инициативы и соответствующих комплексных программ развития перспективных интеллектуальных информационных технологий и систем для моделирования, прогнозирования и принятия управленческих решений, связанных с повышением эффективности экономики и качества жизни населения, а также укрепления обороноспособности и обеспечения национальной безопасности.

Авторы настоящей статьи и возглавляемые ими научные и производственные коллективы в течение уже более тридцати лет выполняют, в том числе в рамках реализации указанной цели, широкомасштабные работы, связанные с созданием, внедрением и использованием отечественной информационно-аналитической платформы (ИАП) проактивного управления жизненным циклом (ЖЦ) сложных технических объектов (СТО) в различных отраслях экономики. Данная ИАП, как показывает анализ, отвечает всем современным требованиям, которые предъявляются к российским информационным системам с точки зрения импортозамещения, а в перспективе и импортоопережения [1, 2]. При решении задач создания, применения и развития (модернизации) рассматриваемой ИАП особую *актуальность* представляют вопросы разработки методологических и методических основ многокритериального структурно-функционального синтеза облика указанной платформы и соответствующих информационно-аналитических систем (ИАС), созданных на ее базе с учетом особенностей конкретных предметных областей.

Переход к методологии проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов. Необходимость решения существующих проблем создания и внедрения новых поколений систем управления ЖЦ СТО привела к проведению отечественными и зарубежными научными школами значительного количества фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований [3—8]. При этом неопределенность сценариев развития для таких высокоинерционных объектов, к каким относятся сами СТО и их системы управления, требует перехода от традиционной *концепции реактивного управления* данными объектами к *концепции проактивного управления*.

Под *проактивным управлением ЖЦ СТО* понимается такой *целенаправленный многоэтапный многофункциональный процесс*, который, в отличие от традиционно используемого *реактивного управления*, основанного на оперативном реагировании и последующем недопущении и компенсации возможных нештатных и аварийных ситуаций, возникающих на различных этапах ЖЦ СТО (с использованием заранее выделенных резервов), предполагает предотвращение возникновения указанных ситуаций за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методах и технологиях системного (комплексного) моделирования и ориентированных, прежде всего, на использование (либо поиск) имеющихся функциональных резервов [4].

Переход к реализации концепции проактивного управления ЖЦ СТО требует проведения широкомасштабных фундаментальных и прикладных исследований, направленных на разработку методологических и методических основ организации такого рода управления, реализуемого на основе органичной интеграции концепций и технологий современных теории организационного управления (менеджмента), общей теории систем, некибернетики и информатики [9]. В качестве примера такого рода исследований можно привести международный проект PROMISE [6—8], в котором участвовали 22 организации из Евросоюза, Швейцарии, Японии, Австралии и США. Данный проект был успешно завершен в 2008 г. В результате выполнения этого проекта была предложена более совершенная технология управления ЖЦ (по сравнению с существующими технологиями PLM и ИПИ), которая получила название CL₂M (Closed Loop Lifecycle Management — управление ЖЦ с обратной связью) [6—8].

Целевая ориентация новой концепции CL₂M — обеспечение принятия управленческих решений в течение ЖЦ СТО на основе **знаний**. В этом случае перспективная система проактивного управления ЖЦ СТО должна функционировать по следующей технологии:

Данные → Информация → Знания → Решение → Действие.

Методология CL₂M расширяет область применения PLM до КМ (Knowledge Management — управление знаниями), т.е. до управления не только техническими изделиями, но и любыми искусственными объектами, в том числе и организационными областями, например, такими, как промышленность, здравоохранение, цепи поставок, технологии изготовления лекарств, продуктов питания и др. Эта технология в перспективе может быть также применена по отношению к людям, животным, инфраструктуре и услугам.

В проекте PROMISE рассматриваются три фазы ЖЦ СТО:

— *начальная* (Beginning of Life — BOL) — фаза создания, включающая в себя проектирование и производство;

— *средняя* (Middle of Life — MOL) — фаза, включающая в себя применение (использование), техническое обслуживание и различные услуги, в том числе ремонт;

— *конечная* (End of Life — EOL) — фаза, которая может характеризоваться различными сценариями: повторным использованием изделия после его модернизации, повторным использованием составных частей или материалов изделия после его разборки, применением новых материалов с улучшенными свойствами, передачей (продажей) для использования по новому назначению или для уничтожения.

В проекте PROMISE было сфокусировано внимание на полном ЖЦ, но основной акцент сделан на необходимости обеспечения обратной связи фаз MOL и EOL с первой фазой BOL. Это было вызвано необходимостью учета следующих обстоятельств: на практике обмен информацией между входящими в состав BOL этапами — проектированием и производством — осуществляется достаточно эффективно благодаря таким интеллектуальным информационным системам, как CAD/CAM. Системы PDM и КМ также эффективно используются предприятиями промышленности и поставщиками. Вместе с тем поток информации между фазами BOL,

МОЛ и ЕОЛ гораздо слабее. Для большинства технических изделий, особенно высокотехнологичных, выработавших назначенный ресурс, изделий бытовой электроники, холодильников, стиральных машин, транспортных средств и т.д., поток информации о них практически обрывается после поставки потребителю, так как обратная связь от потребителей к разработчикам и производителям отсутствует. В настоящее время для обеспечения такой обратной связи в рамках технологии CL_2M планируется широкомасштабное использование киберфизических систем (КФС), которые приходят на смену встроенным системам.

Дальнейшим развитием концепций PROMISE и e-maintenance стали многочисленные концептуальные и практические разработки, связанные с внедрением в различные области человеческой деятельности высоких технологий на интернет-платформе (например, индустриальный Интернет, Интернет вещей), выполненные в различных странах. Данные разработки применительно к космической сфере являются весьма привлекательными, так как в условиях большой кооперации и территориальной распределенности исполнителей перспективных программ научно-технического и технологического развития требуется соответствующая перспективная информационно-коммуникационная среда.

В качестве примера создания проекта „производственного Интернета“ можно привести реализуемую в Германии в настоящее время концепцию Industry 4.0, или концепцию четвертой промышленной революции. Аналоги такой программы существуют и в других странах: „Smart Factory“ в Нидерландах, „Usine du Futur“ во Франции, „High Value Manufacturing Catapult“ в Великобритании, „Fabbrica del Futuro“ в Италии, „Сделано в Китае-2025“ и т.п. В США также обсуждается будущее индустриального производства: так, например, в 2014 г. компании General Electric, AT&T, Cisco, IBM и Intel создали Консорциум промышленного Интернета (Industrial Internet Consortium), который сегодня включает уже 170 членов.

Согласно концепции Industry 4.0., производственное оборудование и производимые им изделия должны стать активными системными компонентами, управляющими своими производственными и логистическими процессами. Они будут включать в себя КФС, связывающие виртуальное пространство Интернета с реальным физическим миром. КФС — это системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, которые представляют собой единое целое. В КФС обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Область действия КФС распространяется на робототехнику, транспорт, энергетику, управление промышленными процессами и крупными инфраструктурами. От существующих мехатронных систем КФС будут отличаться наличием интеллекта и способностью взаимодействовать со своим окружением; планировать и адаптировать собственное поведение согласно окружающим условиям; учиться новым моделям и линиям поведения и самооптимизироваться [6—8]. Ключевой особенностью в КФС является модель, используемая в ее системе управления, — от того, как она соотносится с реальностью, зависит работоспособность и эффективность КФС [6].

Разработчиками отечественной концепции проактивного управления ЖЦ СТО в качестве стратегической цели (миссии) определено формирование методологии *обеспечения технологической независимости* от зарубежных производителей в области создания, эксплуатации и модернизации модельно-алгоритмического, технического, информационного и программного обеспечения процессов комплексной автоматизации и интеллектуализации проактивного управления ЖЦ СТО. Реализация этой цели возможна на основе *принципиально нового подхода* к проектированию и применению соответствующих АСУ СТО (либо ИАС). Данный подход базируется на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных авторами настоящей статьи в рамках развиваемых ими двух прикладных теорий: теории проактивного управления структурной динамикой сложных объектов и теории многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих процессы функционирования СТО и соответствующих АСУ (ИАС)

на различных этапах их ЖЦ (в дальнейшем для краткости последнюю теорию будем называть квалиметрией моделей и ПМК).

Рассмотрим более подробно методологические и методические основы данных теорий.

Научные и практические результаты. Говоря о разработанной теории проактивного управления ЖЦ СТО необходимо, прежде всего, выделить основные классы задач, решаемых в рамках данной теории [9]: задачи целенаправленного и обоснованного расширения разнообразия в интеллектуальных системах управления (сужения разнообразия внешней среды); задачи декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, линеаризации, аппроксимации, релаксации при моделировании, анализе и синтезе адаптивных и самоорганизующихся интеллектуальных технологий и систем проактивного управления СТО; задачи квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, описывающих указанные технологии и системы.

Как показали исследования, в рамках предлагаемой динамической интерпретации процессов проактивного управления ЖЦ СТО и соответствующего полимодельного комплекса возможно формально описать и одновременно решить не только непосредственно задачи проактивного управления ЖЦ указанных объектов, но и задачи создания и применения соответствующих ИАС, обеспечивающих формирование и устойчивую реализацию синтезированного проактивного управления СТО. К данным задачам относятся: проектирование облика модернизируемой/разрабатываемой ИАС (поиск ответа на вопрос — что и когда необходимо модернизировать/разрабатывать); определение срока (момента времени), к которому следует завершить модернизацию/разработку; синтез технологии модернизации/разработки (поиск ответа на вопрос — в какой последовательности следует проводить модернизацию/разработку); формирование и реализация плана проведения модернизации/разработки.

При традиционном проектировании указанные задачи из-за большой размерности решаются с помощью последовательно-параллельной пространственно-временной декомпозиции исходной общей задачи структурно-функционального синтеза облика ИАС проактивного управления ЖЦ СТО без оценивания погрешностей, вызванных использованием соответствующих эвристик и процедур декомпозиции. В этом случае вопросы доказательства полноты, замкнутости и непротиворечивости предлагаемых проектных решений остаются открытыми. В рамках динамической интегративно-управленческо-стоимостной интерпретации процессов создания и применения ИАС ЖЦ СТО, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах современной теории принятия решений, исследований операций, теории систем и управления, информатики удалось на конструктивном уровне подойти как к решению всех перечисленных задач структурно-функционального синтеза и управления развитием ИАС ЖЦ СТО, так и к доказательству корректности соответствующих процедур.

Разработанная теория проактивного управления ЖЦ СТО вносит существенный вклад в развитие современной информатики: благодаря ей современная информатика на конструктивном уровне обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике (обобщенной теории управления). В таблице наряду с известными результатами классической кибернетики, которые до последнего времени не использовались в информатике, представлены результаты, полученные в классической кибернетике, которые привнесены авторами в информатику в ходе создания единой отечественной информационно-аналитической платформы проактивного управления жизненным циклом сложных объектов.

При этом данные результаты применительно к рассматриваемой проблематике имеют более широкую трактовку. Это вызвано тем, что в одна из главных тенденций в области информационных технологий связана с созданием и широким использованием интернет-платформ в различных предметных областях материального производства и оказания услуг (сервисов). Созданная авторами ИАП является одной из реализаций интернет-платформы.

Поэтому рассматриваемая прикладная теория и ее конкретные результаты ориентированы на более общую перспективу.

Фундаментальные научные результаты, полученные в классической кибернетике	Новые научные результаты, привнесенные авторами в современную информатику
Условия управляемости, достижимости и наблюдаемости в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач проверки реализуемости технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете. Выявление основных факторов (ограничений), влияющих на показатели, оценивающие эффективность проактивного управления ЖЦ сложных объектов
Условие существования и единственности оптимального управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) оценивания возможности получения оптимальных решений в задачах синтеза технологии и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном Интернете
Необходимые и достаточные условия оптимальности в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач формирования структуры технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете
Методы и алгоритмы решения задач оптимального управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач автоматизации комплексного планирования (на уровне автоматизированных систем управления предприятием, производственными и технологическими процессами, проектирования производства), мониторинга, оперативного управления, координации информационных процессов в промышленном Интернете
Условия устойчивости и чувствительности в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач оценивания устойчивости (чувствительности) синтезированных технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете к возможным возмущающим воздействиям, изменению состава и структуры исходных данных

Вторая из разработанных теорий — квалиметрия моделей и ПМК, описывающих управляемую структурную динамику СТО, предоставляет разработчикам, исследователям и эксплуатационникам научно-методический аппарат, позволяющий, исходя из поставленных целей и задач проактивного управления ЖЦ СТО, обоснованно выбирать либо синтезировать конкретные модели (ПМК), обеспечивающие эффективное решение данных задач. Благодаря разработанной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов в информатике появился новый математический аппарат, позволяющий повысить обоснованность и качество проектных решений по созданию программно-математического обеспечения информационных систем (в том числе, в рамках разработанной ИАП) и за счет выявления ошибок снизить стоимость его проектирования и эксплуатации.

Практическая значимость разработанных теорий состоит в том, что они получили разнообразную реализацию в виде соответствующего программно-математического и информационного обеспечения информационно-аналитических систем, успешно функционирующих в космонавтике, гражданской авиации, атомной энергетике, промышленном производстве.

Так, на объектах Госкорпорации „Роскосмос“ (космодромы „Плесецк“ и „Восточный“ — для стартового комплекса РН „Рокот“, космодром „Байконур“ — для стартового комплекса РН „Протон“, „Союз“) внедрение информационно-аналитической платформы в систему подготовки и пуска отечественной РКН „Союз-2“ позволило увеличить до 80 % количество аналитически обоснованных принимаемых управленческих решений при подготовке и пуске ракет-носителей. Это достигнуто за счет предварительной систематизации исходных данных и знаний, а также применения многокритериального анализа большего числа альтернативных решений по сравнению с эвристическими подходами [10, 11].

За счет сокращения длительности этапов обработки, анализа и принятия управленческих решений по сравнению с существующими подходами (без снижения их качества) удалось существенно увеличить длительность временного резерва, отводимого на анализ возможных предаварийных, нештатных и аварийных ситуаций и соответствующее восстановление работоспособности узлов и агрегатов РКН „Союз-2“ в реальном масштабе времени в процессе подготовки и пуска. На объектах Госкорпорации „Росатом“ (Смоленская, Ленинградская, Курская АЭС) при эксплуатации единых систем управления защитой ядерных реакторов на атомных электростанциях России было достигнуто 50 %-ное сокращение времени на принятие оперативных решений за счет многовариантного прогнозирования и диагностирования неисправностей системы управления ядерным реактором.

Заключение. Разработка отечественной ИАП и соответствующих информационно-аналитических систем потребовала развития научных основ, включающих в себя две новые прикладные теории: теорию проактивного (упреждающего) управления ЖЦ СТО, а также дополняющую ее теорию многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов, описывающих функционирование СТО и ИАС, в рамках которых осуществляется реализация проактивного управления объектами на различных этапах их ЖЦ. Последнюю теорию авторы назвали квалиметрией моделей и полимодельных комплексов. Данные две теории вносят существенный вклад в развитие современной информатики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия цифровой трансформации ракетно-космической отрасли РФ на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. М.: Гос. корпорация „Роскосмос“, 2019. 33 с.
2. Белов В. С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения: Учеб. пособие. М.: МГУЭСИ, 2005. 111 с.
3. Бурматов С. В. Информационная поддержка жизненного цикла изделий как основа системы менеджмента безопасности авиационной деятельности авиационного комплекса России // Науч. вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 65—70.
4. Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 7—15.
5. Перминов А. Н., Прохорович В. Е., Птушкин А. И. От мониторинга технического состояния ракетно-космической техники к мониторингу ее жизненного цикла // В мире НК. 2004. № 4(26). С. 8—11.
6. PROMISE Consortium. “Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems”: Project Website, 2007 [Электронный ресурс]: <from <http://www.promise.no/>>.
7. Takata S., Kimura F., van Houten F. J. A. M., Westkamper E., Shpitalni M., Ceglarek D., Lee J. Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management // CIRP Annals. 2004. Vol. 53, N 2. P. 643—655.
8. Horvath I., Gerritsen B. H. M. Cyber-Physical Systems: Concepts, technologies and implementation principles // Proc. TMCE. 2012. P. 19—36.
9. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. Ахметов Р. Н., Васильев И. Е., Капитонов В. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовки и пуска ракеты космического назначения „Союз-2“: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 3—54.
11. <https://petrocometa.ru/>

Сведения об авторах

Михаил Юрьевич Охтилев

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: oxt@mail.ru

- Павел Алексеевич Охтилев** — канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. научный сотрудник; E-mail: pavel.oxt@mail.ru
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — д-р техн. наук, чл.-кор. РАН; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; руководитель научного направления СПИИРАН; E-mail: yusupov@iiias.spb.su

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. *Strategiya tsifrovoy transformatsii raketno-kosmicheskoy otrasli RF na period do 2025 goda i perspektivu do 2030 goda* (Strategy for Digital Transformation of the Rocket and Space Industry of the Russian Federation for the Period up to 2025 and the Prospect until 2030), Moscow, 2019, 33 p. (in Russ.)
2. Belov V.S. *Informatsionno-analiticheskiye sistemy. Osnovy proyektirovaniya i primeneniya: uchebnoye posobiye, rukovodstvo, praktikum* (Information-Analytical Systems. Design and Application Fundamentals: Tutorial, Guide, Workshop), Moscow, 2005, 111 p. (in Russ.)
3. Burmatov S.V. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2012, no. 178, pp. 65–70. (in Russ.)
4. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 11(57), pp. 7–15. (in Russ.)
5. Perminov A.N., Prokhorovich V.E., Ptushkin A.I. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya* (V mire NK), 2004, no. 4(26), pp. 8–11. (in Russ.)
6. *PROMISE consortium*, Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems, <http://www.promise.no/>.
7. Takata S., Kimura F., van Houten F.J.A.M., Westkamper E., Shpitalni M., Ceglarek D., Lee J. *CIRP Annals*, 2004, no. 2(53), pp. 643–655.
8. Horvath I., Gerritsen B.H.M. *Proceedings of TMCE*, 2012, pp. 19–36.
9. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring the State and Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
10. Akhmetov R.N., Vasiliev I.E., Kapitonov V.A., Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. *Aerospace Instrument-Making*, 2015, no. 4, pp. 3–54. (in Russ.)
11. <https://petrocometa.ru/>. (in Russ.)

Data on authors

- Mikhail Yu. Okhtilev** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: oxt@mail.ru
- Pavel A. Okhtilev** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Junior Researcher; E-mail: pavel.oxt@mail.ru
- Boris V. Sokolov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
- Rafael M. Yusupov** — Dr. Sci., Corresponding Member of the RAS; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Head of a Scientific Direction of SPIIRAN; E-mail: yusupov@iiias.spb.su

Received 18.07.2022; approved after reviewing 28.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

**ОЦЕНИВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ
ПРИ РАСЧЕТЕ СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ*, А. П. КОВАЛЕВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,**Санкт-Петербург, Россия*** v.a.zelentsov@gmail.com*

Аннотация. Предложены математические модели для оценивания вклада системы эксплуатации в совокупную стоимость владения территориально распределенными техническими комплексами. Рассматриваются базовые стратегии организации технического обслуживания комплексов — плановая календарная и по фиксации отказов. Полученные результаты могут быть использованы для предварительного расчета эксплуатационных затрат и уточнения стоимости жизненного цикла комплексов при их разработке или приобретении.

Ключевые слова: совокупная стоимость владения, распределенные технические комплексы, система эксплуатации, стратегия технического обслуживания и ремонта, эксплуатационные затраты

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Ссылка для цитирования: Зеленцов В. А., Ковалев А. П. Оценивание эксплуатационных затрат при расчете совокупной стоимости владения распределенными техническими комплексами // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 789—795. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-789-795.

**ESTIMATION OF OPERATING COSTS
WHEN CALCULATING THE TOTAL COST OF OWNERSHIP
OF DISTRIBUTED TECHNICAL COMPLEXES**

V. A. Zelentsov*, A. P. Kovalev

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,**St. Petersburg, Russia*** v.a.zelentsov@gmail.com*

Abstract. Mathematical models are proposed for estimating the contribution of the cost of the operating system to the total cost of ownership of geographically distributed technical complexes. The basic strategies in organization of the complexes maintenance are considered — planned calendar maintenance and maintenance for fixing failures. The results obtained can be used for preliminary calculation of operational costs and clarification of the cost of the life cycle of complexes during their development or acquisition.

Keywords: total cost of ownership, distributed technical complexes, operation system, maintenance and repair strategy, operating costs

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 22-19-00767.

For citation: Zelentsov V. A., Kovalev A. P. Estimation of operating costs when calculating the total cost of ownership of distributed technical complexes. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 789—795 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-789-795.

Введение. Понятие совокупной стоимости владения (от англ. — total cost of ownership, ТСО) используется для оценивания полного объема затрат, которые необходимо понести не только для разработки или приобретения какого-либо изделия или системы, но и для обеспечения их эксплуатации в течение всего жизненного цикла. Такой подход особенно актуален применительно к сложным распределенным техническим комплексам (РТК), таким как информационно-вычислительные системы, АСУ, информационно-телекоммуникационные

системы, системы телевидения и радиовещания, радиотехнические системы и др. Затраты на эксплуатацию подобных РТК могут в несколько раз превышать первоначальные затраты на их разработку и приобретение. Уровень эксплуатационных затрат существенно зависит от надежности компонентов РТК и системы эксплуатации (СЭ), на которую возлагаются задачи восстановления и поддержания работоспособности РТК в пределах жизненного цикла. В настоящее время в исследованиях, посвященных анализу совокупной стоимости владения (ССВ) [1—4], вопросам оценивания влияния способа построения и функционирования СЭ на ССВ РТК уделяется недостаточно внимания. Это определяет актуальность привлечения и развития результатов разработок, касающихся оптимизации структуры и алгоритмов функционирования СЭ РТК, для проведения детального расчета эксплуатационных затрат как составной части ССВ [5, 6].

Особенности оценивания ССВ с учетом системы эксплуатации РТК. Оценивание ССВ осуществляется на этапе создания (приобретения) РТК и включает расчет капитальных затрат, а также будущих эксплуатационных затрат, приведенных к моменту начала функционирования РТК с помощью коэффициента дисконтирования. Упрощенно такой расчет представляется выражением

$$C_{\text{ССВ}} = \sum_{i=1}^N (1+E)^{-i} C_{\text{э}}^i + C_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{к}}$ — капитальные затраты на создание (приобретение) РТК; $C_{\text{э}}^i$ — эксплуатационные затраты за i -й период эксплуатации, обычно длительность периода принимается равной одному году; E — коэффициент дисконтирования; N — длительность жизненного цикла РТК (в годах).

Эксплуатационные затраты включают целый ряд составляющих. Например, при создании систем спутникового телевидения в состав эксплуатационных затрат входят затраты, связанные с арендой спутникового сегмента, обновлением программного обеспечения, оплатой труда персонала, содержанием офисов, покупкой расходных материалов и др. Кроме того, важнейшей частью эксплуатационных затрат являются затраты на эксплуатацию профессионального оборудования (не менее 30 %), а также затраты, обусловленные простоями РТК из-за отказов и планового технического обслуживания. Затраты на эксплуатацию оборудования и потери от простоев зависят от надежности РТК, а также от способов построения системы эксплуатации, в рамках которой осуществляется восстановление работоспособности РТК после отказов и поддержание работоспособности путем проведения профилактического технического обслуживания.

Необходимо отметить, что затраты, связанные с системой эксплуатации, включают также и капитальные затраты. Их достаточно просто учесть включением в состав общих капитальных затрат на создание или закупку РТК. Гораздо сложнее оценить эксплуатационные затраты, для расчета которых требуется разработка математических моделей, описывающих процессы отказов и восстановлений компонентов РТК, а также процессы их технического обслуживания в формируемых системах эксплуатации РТК. Именно этой составляющей ССВ будет уделено основное внимание в настоящей статье.

В состав системы эксплуатации в общем случае входят склады и комплекты ЗИП, центры и бригады технического обслуживания и ремонта, ремонтные органы, средства измерений параметров технического состояния компонентов РТК, средства сбора и обработки информации о техническом состоянии, органы управления, обслуживающий персонал, необходимая документация и программное обеспечение.

Вне зависимости от конкретного назначения РТК система его эксплуатации может быть представлена в виде совокупности нескольких функциональных подсистем — информационно-измерительной, информационно-управляющей, и подсистемы поддержания и восстановления работоспособности (ППВР) [5]. Информационно-измерительная и информационно-

управляющая подсистемы объединены едиными информационными процессами сбора и передачи информации о техническом состоянии компонентов РТК и по этому признаку могут быть объединены в одну подсистему сбора и обработки информации о техническом состоянии средств РТК (коротко — информационную подсистему (ИПС)).

Соответственно, при расчете ССВ примем, что для каждого i -го периода эксплуатации в состав параметра C_i из формулы (1) входят затраты $C_{СЭ}$, обусловленные функционированием системы эксплуатации:

$$C_{СЭ} = C_{ИПС} + C_{ППВР}, \quad (2)$$

при этом, в соответствии с постановкой задачи, оба слагаемых в данном выражении включают только эксплуатационные затраты и не учитывают капитальных расходов на построение СЭ.

В выражении (2) верхний индекс „ i “ опущен для упрощения записи, однако расчет производится применительно к годовым эксплуатационным затратам.

Рассмотрим далее порядок расчета составляющих формулы (2).

Расчет затрат на функционирование ИПС. Эксплуатационные затраты при функционировании ИПС складываются из затрат на решение задач по сбору и обработке элементами подсистемы измерительной информации о техническом состоянии компонентов РТК, а также затрат на передачу информации между элементами ИПС.

Для решения любой задачи может понадобиться информация двух видов: исходная, изначально имеющаяся и распределенная по элементам различных уровней иерархии ИПС — информация первого вида, и информация второго вида, получаемая в результате решения других, предшествующих задач. Примером информации первого вида могут служить результаты измерений параметров технического состояния (ТС) компонентов РТК, сведения о численности и квалификации персонала, привлекаемого для проведения технического обслуживания (ТО) и ремонтов, сведения о применении РТК по назначению и т.д. Информация второго вида — это спрогнозированные моменты выхода параметров ТС за пределы допусков, желаемые объемы и периоды ТО компонентов РТК и др. Наличие информации первого вида будем определять с помощью матрицы $\mathbf{V}^{(1)} = \|v_{kn}^{(1)}\|_N^K$, а информационную взаимосвязь между задачами будем описывать с помощью матрицы $\mathbf{V}^{(2)} = \|v_{kr}^{(2)}\|_K^K$, где $v_{kn}^{(1)}$ — объем информации (килобайт), необходимой для решения k -й задачи и имеющейся на n -м элементе; $v_{kr}^{(2)}$ — объем информации о результатах решения r -й задачи, необходимый для решения k -й задачи.

Обозначим через $\mathbf{X} = \|x_{kn}\|_N^K$ вариант распределения задач по элементам ИПС, где

$$x_{kn} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-я задача решается } n\text{-м элементом,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Введем также обозначения:

— s_{kn} — затраты на решение k -й задачи n -м элементом;

— c_{ln} — затраты на передачу единицы объема информации между элементами n и l .

С учетом заданного в СЭ распределения задач по сбору и обработке информации по элементам ИПС затраты на функционирование подсистемы определяются следующим образом:

$$C_{ИПС} = N_{ц} \sum_{k=1}^k \sum_{n=1}^N x_{kn} \left[s_{kn} + \sum_{l=1}^N v_{kl}^{(2)} c_{nl} + \sum_{r=1}^k \sum_{n=1}^N v_{kr}^{(2)} x_{rl} c_{nl} \right], \quad (3)$$

где $N_{ц}$ — число циклов решения задач ИПС в течение рассматриваемого периода эксплуатации.

Расчет затрат на функционирование ППВР. Эксплуатационные затраты на функционирование ППВР включают в качестве основных составляющих расходы на содержание бригад ТО и ремонта, собственно расходы на проведение мероприятий по поддержанию и

восстановлению работоспособности РТК, а также транспортные расходы на выезды бригад к местам проведения ТО и ремонтов (либо доставку отказавших компонентов РТК к местам проведения работ):

Затраты на содержание бригад обслуживающего персонала определяются как

$$C_{\text{бр}} = \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^{p_j} C_{\text{бр } jk}, \quad (4)$$

где $C_{\text{бр } jk}$ — годовые затраты на содержание k -й бригады обслуживающего персонала в j -м центре ТО и ремонта (ЦТОР), $j = \overline{1, g}$; p_j — количество бригад обслуживающего персонала в j -м ЦТОР, g — общее количество ЦТОР.

Затраты на ТО и ремонты складываются из соответствующих затрат на каждый компонент РТК ($C_{\text{ТОР}} = \sum_{q=1}^Q C_{\text{ТОР } q}$, где Q — общее число компонентов) и существенным образом

зависят от характеристик надежности обслуживаемых компонентов, а также от принятой стратегии и конкретных значений периодичности и объемов ТО.

Рассмотрим математическую модель расчета эксплуатационных затрат для двух видов стратегий ТО, охватывающих широкий класс используемых на практике правил обслуживания.

Стратегия 1. ТО компонентов проводится через определенные календарные периоды времени T , при возникновении отказов на интервале между этапами ТО немедленно начинается их устранение.

Стратегия 2. Плановое ТО компонентов не проводится, обслуживание (ремонт) производится только при отказе.

Заметим, что стратегия 2 является частным случаем стратегии 1 при периоде $T \rightarrow \infty$. Поэтому остановимся подробнее на стратегии 1.

Будем считать, что в процессе ТО или ремонтов полностью восстанавливаются утрачиваемые в процессе эксплуатации свойства обслуживаемых технических средств (компонентов РТК), и введем в рассмотрение случайный процесс $\xi(t)$, характеризующий состояние компонента в момент времени t (индекс номера компонента РТК для упрощения записи здесь и ниже опущен). Полагаем, что

$$\xi(t) = \begin{cases} A_0, & \text{если в момент } t \text{ компонент работоспособен;} \\ A_1, & \text{если в момент } t \text{ компонент находится} \\ & \text{в состоянии отказа (на ремонте);} \\ A_2, & \text{если в момент } t \text{ проводится ТО компонента.} \end{cases}$$

В момент окончания ТО дальнейшее течение процесса $\xi(t)$ не зависит от прошлого, так как в этот момент происходит полное восстановление элемента и перепланирование последующего ТО. Длительности интервалов между моментами соседних обновлений являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами, формирующими процесс восстановления [7]. Это означает, что $\xi(t)$ является для данных стратегий регенерирующим случайным процессом, его точками регенерации будут моменты $\xi_k = kT_p$, $k = 1, 2, \dots$, где $T_p = T + \tau_{\text{ТО}}$ — период регенерации, T — период ТО, $\tau_{\text{ТО}}$ — длительность ТО.

Используя методы анализа регенерирующих случайных процессов [8, 9], получим следующее соотношение для средних удельных (приходящихся на единицу времени) затрат на ТО и ремонт компонента РТК:

$$C_{\text{уд}} = \frac{c_{\text{в}} M[\tau_{\text{в}}(T_p)] + c_{\text{ТО}} M[\tau_{\text{ТО}}]}{M[T_p]}, \quad (5)$$

где $M[\tau_b(T_p)] = \bar{\tau}_b(T)$ — математическое ожидание (МО) времени пребывания компонента в состоянии A_1 (в состоянии восстановления работоспособности) за период регенерации; $M[T_p]$ — МО длительности периода регенерации; $M[\tau_{TO}] = \bar{\tau}_{TO}$ — МО длительности ТО; c_b и c_{TO} — удельные затраты на восстановление работоспособности и ТО компонента соответственно.

Период ТО в общем случае может быть случайной величиной с функцией распределения $\Phi(t)$. Тогда

$$C_{уд} = \frac{\int_0^{\infty} \left\{ c_b \left[T - \int_0^{\infty} R(t, T) dt \right] + c_{TO} \bar{\tau}_{TO} \right\} d\Phi(T)}{\int_0^{\infty} (T + \bar{\tau}_{TO}) d\Phi(T)}, \quad (6)$$

где $R(t, T) = P\{\tau_{b,p}(T) > t\}$ — дополнительная функция распределения случайной величины $\tau_{b,p}(T)$ времени пребывания компонента в состоянии A_0 за период регенерации, т.е. времени его безотказной работы за период регенерации.

При детерминированном периоде ТО

$$C_{уд} = \frac{c_b [T - \bar{\tau}_{b,p}(T)] + c_{TO} \bar{\tau}_{TO}}{T + \bar{\tau}_{TO}}, \quad (7)$$

где $\bar{\tau}_{b,p}(T)$ — МО времени безотказной работы компонента за период регенерации.

Таким образом, общие затраты на ТО и ремонт одного произвольного компонента РТК за оцениваемый период эксплуатации T_3 при использовании 1-й стратегии ТО будут равны

$$C_{ТОР} = \frac{T_3}{T + \bar{\tau}_{TO}} \{ c_b [T - \bar{\tau}_{b,p}(T)] + c_{TO} \bar{\tau}_{TO} \}. \quad (8)$$

В частном случае, при отсутствии профилактических мероприятий, т.е. при $T \rightarrow \infty$, что соответствует стратегии 2, получим известное соотношение

$$C_{ТОР} = T_3 c_b \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{\tau}_{b,p} + \bar{\tau}_b}, \quad (9)$$

Наконец, транспортные расходы определяются как средние суммарные за год эксплуатации затраты на передвижения, связанные с проведением ТО или ремонтов. Величина транспортных затрат зависит от взаимного расположения обслуживаемых компонентов и элементов ППВР, особенностей организации логистики, а также от надежности компонентов и используемой стратегии ТО и ремонта, характеризующих частоту поездок для проведения обслуживаний. Кроме того, транспортные затраты зависят от того, где проводятся ТО и ремонт — в центрах ТО и ремонта или на местах расположения компонентов. Исходя из этого, величина среднегодовых транспортных затрат при использовании плановой стратегии ТО определяется следующим образом:

$$C_{тр} = \sum_{j=1}^g \sum_{n \in I_j} T_3 c_{трjn} \left[\frac{1}{\bar{\tau}_{b,pn}(T_n)} + \frac{1}{T_n} \right], \quad (10)$$

где I_j — множество номеров компонентов, расположенных в зоне обслуживания j -го ЦТОР; $c_{трjn}$ — затраты на проезд между j -м ЦТОР и n -м элементом из зоны обслуживания j -го ЦТОР; $\bar{\tau}_{b,pn}$, T_n — средняя наработка на отказ и период ТО n -го элемента соответственно.

В случае использования стратегии ТО по фиксации отказа

$$C_{\text{тр}} = \sum_{j=1}^g \sum_{n \in I_j} T_3 \frac{C_{\text{тр } jn}}{T_{jn}}, \quad (11)$$

Таким образом, общая величина затрат по рассмотренным составляющим за один период эксплуатации равна

$$C_{\text{ППВР}} = C_{\text{б.р}} + \sum_{m=1}^M C_{\text{ТОР}_m} + C_{\text{тр}}, \quad (12)$$

где M — общее число обслуживаемых компонентов РТК, стоимость ТО и ремонта каждого из которых за период эксплуатации рассчитывается по формуле (8) или (9) в зависимости от принятой стратегии ТО.

Результаты расчетов затрат на функционирование ИПС и ППВР, формулы (3) и (12), для каждого периода эксплуатации далее необходимо подставить в соотношение (1) на место соответствующих составляющих эксплуатационных затрат для оценивания совокупной стоимости владения.

Заключение. Предложены модели расчета затрат на эксплуатацию РТК при оценке ССВ, позволяющие учесть особенности построения и функционирования системы эксплуатации этих комплексов, а также проанализировать влияние принятых стратегий ТО и ремонта на итоговые результаты расчетов. С учетом доли эксплуатационных затрат в совокупной стоимости владения это влияние может быть достаточно существенным. Поэтому важнейшим принципом создания сложных распределенных технических комплексов различного назначения является необходимость совместной разработки РТК и систем их эксплуатации. Цель такой разработки — оптимизация структуры и алгоритмов функционирования системы эксплуатации конкретного РТК по критерию минимума совокупной стоимости владения РТК и в итоге максимизации дохода от РТК при выполнении требований к целевым показателям качества его функционирования. В статье рассмотрены лишь основы подхода к оценке вклада СЭ в итоговую ССВ. Полное решение подобных задач требует проведения дальнейших исследований по оцениванию составляющих ССВ с детальным учетом структурного построения систем эксплуатации РТК и алгоритмов их функционирования, ограниченных возможностей СЭ по одновременному обслуживанию нескольких компонентов РТК и других особенностей организации эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипкин К. Т. Экономическая эффективность информационных систем. М.: ДМК-Пресс, 2002. 256 с.
2. Карпычев В. Ю. Управление совокупной стоимостью владения информационной системой: современное состояние и перспективы // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 8(107). С. 25—37.
3. Хубаев Г. Н., Родина О. В. Модели, методы и программный инструментарий оценки совокупной стоимости владения объектами длительного пользования (на примере программных систем). Ростов н/Д: РГЭУ (РИНХ), 2011. 336 с.
4. Борисов С. А., Плеханова А. Ф., Клименко О. Н. Особенности учета затрат на осуществление проектов в области информационных систем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2 [Электронный ресурс]: <<https://science-education.ru/ru/article/view?id=12655>>, 21.07.2022.
5. Ковалев А. П. Формирование требований к надежности и системам эксплуатации распределенных технических комплексов. СПб: Оракул, 1999. 96 с.
6. Зеленцов В. А., Ковалев А. П. Ресурсосберегающие технологии создания и эксплуатации сложных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 3.
7. Кокс Д. Р., Смит В. Л. Теория восстановления. М.: Сов. радио, 1967. 299 с.

8. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Организация обслуживания при ограниченной информации и надежности системы. М.: Сов. радио, 1975.
9. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов и др.; под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Зеленцов** — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Александр Павлович Ковалев** — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: kbarsenal@peterlink.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Skripkin K.T. *Ekonomicheskaya effektivnost' informatsionnykh system* (Economic Efficiency of Information Systems), Moscow, 2002, 256 p. (in Russ.)
2. Karpichev V.Yu. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2015, no. 8(14), pp. 25–37. (in Russ.)
3. Khubaev G.N., Rodina O.V. *Modeli, metody i programmy instrumentariy otsenki sovokupnoy stoimosti vladeniya ob'yektami dlitel'nogo pol'zovaniya (na primere programmykh sistem)* (Models, Methods and Software Tools for Assessing the Total Cost of Ownership of Durable Objects (On the Example of Software Systems)), Rostov-on-Don, 2011, 336 p. (in Russ.)
4. Borisov S.A., Plekhanova A.F., Klimenko O.N. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 2, <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12655>. (in Russ.)
5. Kovalev A.P. *Formirovaniye trebovaniy k nadezhnosti i sistemam ekspluatatsii raspredelennykh tekhnicheskikh kompleksov* (Formation of Requirements for Reliability and Operation Systems of Distributed Technical Complexes), St. Petersburg, 1999, 96 p. (in Russ.)
6. Zelentsov V.A., Kovalev A.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2000, no. 3. (in Russ.)
7. Cox D.R. *Renewal Theory*, Netherlands, Springer, 1967, 142 p.
8. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. *Organizatsiya obsluzhivaniya pri ogranichennoy informatsii i nadezhnosti sistemy* (Service Organization with Limited Information and System Reliability) Moscow, 1975. (in Russ.)
9. Barzilovich E.Yu., Belyaev Yu.K., Kashtanov V.A. et al. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti* (Questions of the Mathematical Theory of Reliability), Moscow, 1983, 376 p. (in Russ.)

Data on authors

- Viacheslav A. Zelentsov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Alexander P. Kovalev** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: kbarsenal@peterlink.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 25.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
МОДЕЛЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ И УПОРЯДОЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

С. В. МИКОНИ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
smikoni@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается проблема объединения моделей классификации и упорядочения объектов в рамках одной системы поддержки принятия решений. Проблема решается путем поиска сходства и различия соответствующих моделей с применением методов системного анализа. Рассмотрены связи между моделями классификации с четкими и нечеткими границами классов, моделями упорядочения объектов с жесткими и мягкими ограничениями к значениям показателей. Введено понятие реальной цели, позволяющее связать между собой методы многоцелевой и условной оптимизации, а их, в свою очередь, с методами многомерной теории ценности и полезности. Трактующаяся как граница между классами реальная цель позволяет связать методы классифицирования и упорядочения объектов. Найденные связи являются основанием для объединения рассмотренных методов в рамках общей системы поддержки принятия решений, что дает большие возможности для принятия решений разными методами и сопоставления получаемых результатов.

Ключевые слова: классификация, класс, упорядочение, выбор, цель, оценочная функция, система поддержки принятия решений

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004; автор выражает благодарность канд. техн. наук Д. П. Буракову.

Ссылка для цитирования: Микони С. В. Системный анализ моделей классификации и упорядочения объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 796—801. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-796-801.

SYSTEM ANALYSIS OF CLASSIFICATION AND ORDERING MODELS OF OBJECTS

S. V. Mikoni

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
smikoni@mail.ru*

Abstract. The problem of combining models of classification and ordering of objects within one decision support system is considered. The problem is solved by searching for similarities and differences of the corresponding models using the system analysis methods. Relations between classification models with clear and fuzzy class boundaries, models of ordering objects with hard and soft restrictions on the indicators' values are considered. The concept of a real goal is introduced, which makes it possible to link the methods of multi-objective and conditional optimization, and these, in turn, with the methods of the multidimensional theory of value and utility. Interpreted as a boundary between classes, the real goal allows to link the methods of classifying and emphasizing objects. The revealed connections are the basis for combining the considered methods within the framework of a common decision support system, which gives great opportunities for making decisions using different methods and comparing the results obtained.

Keywords: classification, class, ordering, choice, goal, evaluation function, decision support system

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the budget theme FFZF-2022-0004; the author expresses his gratitude to D. P. Burakov, PhD.

For citation: Mikoni S. V. System analysis of classification and ordering models of objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 796—801 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-796-801.

Введение. Конечной целью принятия решения является либо выбор класса, к которому принадлежит оцениваемый объект, либо выбор предпочтительного объекта из класса на основе отношения порядка. Эти задачи обычно решаются порознь и автоматизируются в рамках различных программных систем [1—4]. Более того, даже методы одного назначения реализуются в рамках разных систем поддержки принятия решений (СППР). Однако то, что оправдано для специализированных систем, не может претендовать на универсальность. Универсальность системы, моделирующей принятие решения, востребована для оценивания объектов разными методами. Помимо этого, существует потребность объединить методы классификации и упорядочения объектов в рамках одной системы, опираясь на общность свойств объекта, подлежащих оцениванию в обеих группах методов. Для решения такой задачи необходимо найти связи между методами каждой из групп и между группами. В настоящей статье предлагается подход к решению этой задачи.

Классификация. По мнению Ж. Б. Ламарка, „всякая наука начинается с классификации“, а по мнению Д. И. Менделеева, „наука начинается там, где начинают измерять“. Кажущееся противоречие этих высказываний о начале науки исключается, если обобщить измерения на номинальную шкалу. Именно в номинальной шкале, т.е. именами, и измеряются классифицируемые понятия. Примером применения номинальной шкалы является присваивание объекту x некоторого имени C . Моделью такой шкалы является двухместный предикат *Присвоить* (x, C). Поскольку шкала именовании менее информативна, чем порядковая шкала, применяемая при упорядочении объектов, начнем с рассмотрения моделей классификации.

Простейшая классификация — это деление множества объектов на классы относительно классификационных признаков с двумя противоположными значениями. Условием правильной n -мерной классификации является независимость классификационных признаков, их ортогональность в n -мерном пространстве. Задача n -мерной классификации решается либо последовательно, либо параллельно. Примером первого варианта является дихотомическая классификация. Параллельная классификация представляет собой набор независимых фасет с противоположными значениями признаков.

В настоящей работе рассматривается обратная задача классификации, т.е. не создание классов, а отнесение объекта x к одному из известных классов $h \in H$, $|H| = m$, $m > 1$, по значениям характеризующих его показателей. Под классом h_k будем понимать отрезок $[c_{jн}^k, c_{jв}^k]$, принадлежащий шкале $[y_{j, \min}, y_{j, \max}]$ j -го показателя, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, m}$.

Классификация с четкими границами классов. Условие четких границ между смежными классами h_k и h_{k+1} на шкале j -го показателя определяется как

$$[c_{jн}^k, c_{jв}^k] \cap [c_{jн}^{k+1}, c_{jв}^{k+1}] = \emptyset, \quad k = \overline{1, m-1}. \quad (1)$$

Объект x принадлежит к классу h , представленному отрезком $[c_{jн}, c_{jв}]$ с нижней и верхней границами $c_{jн}$ и $c_{jв}$ на шкале $[y_{j, \min}, y_{j, \max}]$ j -го показателя, $y_{j, \min} \leq c_{jн} \leq c_{jв} \leq y_{j, \max}$, если $y_j(x) \in [c_{jн}, c_{jв}]$. В префиксной (функциональной) записи это условие имеет вид: $\in(y_j(x), [c_{jн}, c_{jв}])$. Как логическая функция оно представляет собой двухместный предикат в значении „истина“, задающий логическое правило формирования класса h . Значению „ложь“ этого предиката соответствует выражение $\notin(y_j(x), [c_{jн}, c_{jв}])$.

Отсюда следует, что условиями отнесения объекта x по j -му показателю к одному из классов $h \in H$ являются:

- 1) наличие не менее двух классов $|H| = m > 1$;
- 2) задание интервала значений $[c_{jн}^k, c_{jв}^k]$ j -го показателя для каждого класса, $k = \overline{1, m}$;
- 3) применение отношения *соответствия*, реализуемого предикатом принадлежности значения к k -му отрезку шкалы:

$$\in \left(y_j(x), \left[c_{jн}^k, c_{jв}^k \right] \right), \quad k = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Частный случай отнесения объекта x к одному из двух взаимоисключающих классов („норма/ не норма“) представляет собой задачу отбора.

Если классы $h_k \in H$, $k = \overline{1, m}$, характеризуются n показателями, то принадлежность к k -му классу представляется конъюнкцией двухместных предикатов по j :

$$\bigwedge_{j=1}^n \in \left(y_j(x), \left[c_{jн}^k, c_{jв}^k \right] \right), \quad k = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Значение „истина“ логической функции (3) означает принадлежность объекта x к k -му классу по всем показателям. Значение „ложь“ означает либо отсутствие принадлежности, либо частичную принадлежность объекта x к k -му классу, если хотя бы один из предикатов принадлежности к k -му классу в формуле (3) является истинным. При r истинных предикатах, $0 < r < n$, оценкой частичной принадлежности к k -му классу является относительная величина r_k / n . В этом случае выбирается тот класс h^* , частичная принадлежность к которому принимает максимальное значение:

$$h^* = h_t, \quad t = \arg \max_k \frac{r_k}{n}. \quad (4)$$

При классифицировании нескольких объектов величина r_k/n может быть использована для их упорядочения по частичной принадлежности к k -му классу, $k = \overline{1, m}$.

Классификация с нечеткими границами классов. Нечеткая классификация следует из нарушения условия (1). Она характеризуется исходной частичной принадлежностью объекта более чем к одному классу. Этот случай моделируется бесконечнозначной логикой Л. Заде. С применением функции принадлежности $\mu_{jk}(x)$, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, m}$, с областью значений $[0, 1]$ появляется возможность установления отношения частичного порядка на множестве классов H по значениям функции $\mu_{jk}(x)$ в интервале $0 < \mu_{jk} < 1$. Выбирается тот класс h_j^* , для которого эта функция по j -му показателю принимает максимальное значение:

$$h_j^* = h_t, \quad t = \arg \max_k \mu_{jk}(x). \quad (5)$$

В выражении (5) функция $\mu_{jk}(x)$ играет роль целевой функции, применяемой в задачах оптимизации: $\mu_{jk}(x) \rightarrow \max$. Иными словами, задача классификации решается методом оптимизации. Для классифицирования объекта x по n показателям вычисляется средневзвешенная аддитивная свертка частных принадлежностей к каждому классу, где w_j — значимость j -го показателя:

$$\mu_k(x) = \sum_{j=1}^n w_j \mu_{jk}(x), \quad k = \overline{1, m}. \quad (6)$$

По n показателям выбирается класс h^* с максимальным значением μ_k :

$$h^* = h_t, \quad t = \arg \max_k \mu_k(x). \quad (7)$$

При классифицировании объектов из множества X функция $\mu_k(x)$ может использоваться для установления отношения частичного порядка на этом множестве по степени принадлежности к каждому классу [5—7]. Если классы имеют одинаковый порядок на шкале каждого показателя, то существует возможность сквозного упорядочения объектов из множества X на основе значений функции принадлежности к классам [8].

Для случая двух нечетких классов („норма/не норма“) может решаться задача мониторинга и ранней диагностики объекта по степени отклонения от нормы как каждого параметра, так и их совокупности [9].

Упорядочение объектов. Установление отношения порядка на множестве объектов X выполняется при следующих условиях:

- 1) наличие не менее двух объектов $|X| = N > 1$;
- 2) точечное задание целевого значения c_j на шкале каждого j -го показателя;
- 3) применение отношения *превосходства*, реализуемого предикатом:

$$\succ(y_j(x), c_j). \quad (8)$$

Отношение строгого превосходства реализуется арифметическими предикатами „больше“ ($>$) или „меньше“ ($<$). Им соответствуют *целевые* значения j -го показателя, совпадающие с одной из границ шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$: $c_j = y_{j,\min}$ или $c_j = y_{j,\max}$. В [10] такое целевое значение названо *идеальной* целью, поскольку оно определяет размах выборки объектов либо теоретическую границу показателя. Если все компоненты вектора целей $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_j, \dots, c_n)$ являются идеальными целями, осуществляется упорядочение объектов относительно идеальной цели. Степень ее достижения определяется средневзвешенной оценкой объекта по всем показателям. Этот подход к упорядочению объектов реализуется методом многоцелевой оптимизации (Multiobjective Optimization) [11]. В случае когда объекты несравнимы по ресурсам, для каждого из них формируется свой вектор целей $\mathbf{c}_i = (c_{i1}, \dots, c_{ij}, \dots, c_{in})$, $i = \overline{1, N}$, и они упорядочиваются по процентам достижения своих *индивидуальных* целей [12].

В более общем случае сочетаются отношения строгого и нестрогого превосходства. Второе из них реализуется арифметическими предикатами „не менее“ ($\geq$) или „не более“ ($\leq$). Если они используются в роли ограничений, не удовлетворяющие им объекты исключаются из процесса оценивания, а остальные упорядочиваются относительно идеальной цели. Эта задача решается методом условной оптимизации (Multiobjective Optimization with Constraints) [13]. В частном случае при одной целевой функции имеет место классическая задача оптимизации.

Упорядочение объектов согласно мягким ограничениям. Это название такое упорядочение получило в силу того, что объект, не удовлетворяющий ограничению, не исключается, а подвергается упорядочению наравне с другими [14]. В дальнейшем этот подход был назван упорядочением по реальным целям. *Реальной* целью называется целевое значение c_j , не совпадающее с границей шкалы показателя: $y_{j,\min} < c_j < y_{j,\max}$. Такое название обосновывается согласованием целевого значения показателя с ресурсами, имеющимися для его достижения. Ценность этого показателя моделируется кусочно-линейной монотонной нормирующей функцией, обобщением которой является нелинейная функция ценности [15].

Принципиальной особенностью реальной цели является разбиение шкалы показателя на два участка — не удовлетворяющего и удовлетворяющего нестрогому ограничению. При использовании функции ценности с областью значений $[0, 1]$ значение показателя на первом участке может рассматриваться как невыполнение цели, а на втором — как перевыполнение. При использовании функции полезности с областью значений $[-1, 1]$ на ее отрицательной полуоси $[-1, 0)$ моделируется ущерб, обусловленный невыполнением цели, а на положительной полуоси $(0, 1]$ — доход от ее перевыполнения. В модели лотереи точка c_j на шкале показателя означает отказ от участия в ней с функцией полезности $u(c_j) = 0$ [16].

Таким образом, реальная цель является связующим звеном между методами многоцелевой (многокритериальной) оптимизации и методами теории многомерной ценности (Multi-Attribute Value Theory) и полезности (Multi-Attribute Utility Theory). Она позволяет также упорядочивать объекты по штрафам (по степени невыполнения цели) и поощрениям (по степени перевыполнения цели). С учетом изложенного введение понятия реальной цели расширяет разнообразие задач упорядочения объектов.

Заключение. Общность свойств, оцениваемых в задачах классификации и упорядочения объектов, является обоснованием инвариантности модели объекта по отношению к реализуемым методам классификации и упорядочения. Между собой модели классификации

и упорядочения различаются видом используемого отношения (соответствие/превосходство) и способом задания значений на шкале показателя (интервальное и точечное). Введение понятия реальной цели, делящей шкалу показателя на две части, связывает эти способы через полуинтервалы значений. Реальная цель также связывает через оценочные функции методы многокритериальной оптимизации с методами теории многомерной ценности и полезности. При этом имеет место определенная аналогия между частичной принадлежностью к классу в методах классификации и степенью достижимости цели в методах многомерной оптимизации. Установленные связи между методами классификации и упорядочения объектов как внутри групп методов, так и между группами позволяют объединять различные методы в рамках общей СППР для решения разнообразных практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программное обеспечение для принятия решений [Электронный ресурс]: <<https://ru.wikipedia.org/wiki/>>.
2. *Figueira G., Amorim P., Guimar L., Amorim-Lopes M., Neves-Moreira F., Almada-Lobo B.* A decision support system for the operational production planning and scheduling of an integrated pulp and paper mill // *Computers & Chemical Engineering*. 2015. N 77. P. 85—104.
3. *Kar A. K.* A hybrid group decision support system for supplier selection using analytic hierarchy process, fuzzy set theory and neural network // *Journal of Computational Science*. 2015. N 6. P. 23—33.
4. *Kozhombardieva G., Burakov D. P., Khamchichev G. A.* Decision-Making Support Software Tools Based on Original Authoring Bayesian Probabilistic Models // *Journal of Physics Conference*. 2022. Ser. 2224(1). P. 1—8.
5. *Sun C. C.* A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS method // *Expert Syst. Appl.* 2010. N 37. P. 7745—7754.
6. *Prokopchina S. V.* Methodological foundations of scaling in modern Measurement Theory. Classification of measurement scales and their application under uncertainty based on Bayesian Intelligent Technologies // *Journal of Physics Conference*. 2020. Ser. 1703(1). P. 012003.
7. *Qiansheng Zhang, Dongfang Sun.* An Improved Decision-Making Approach Based on Interval-valued Fuzzy Soft Set // *Journal of Physics Conference*. 2021. Ser. 1828. P. 012041.
8. Микони С. В., Гарина М. И. Условие одинакового упорядочения объектов по функциям полезности и принадлежности // Тр. Конгресса IS&IT'11, Дивноморское, 3-10.09.2011. М.: Физматлит, 2011. Т. 1. С. 33—37.
9. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Теоретические и прикладные проблемы разработки и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических объектов // Тр. СПИИРАН. 2002. № 1(1). С. 167—180.
10. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений: Учеб. пособие. СПб: Лань, 2015. 448 с.
11. *Velasquez M., Hester P. T.* An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // *Intern. Journal of Operations Research*. 2013. Vol. 10, N 2. P. 56—66.
12. Микони С. В., Тихомиров В. О., Тришанков В. В., Сорокина М. И. Определение рейтинга подразделений железной дороги по итогам выполнения планов // Тр. X конф. „Региональная информатика-2004“, 24-26.10.2006. СПб: СПОИСУ, 2006. С. 266—273.
13. *Пережудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.* Введение в системный анализ. М.: Высш. школа, 1989. 367 с.
14. *Mikoni S. V.* Method of choice by approximation to a pattern // *Proc. Conf. NITE'2000*. Minsk: Belarus State Economic University, 2000. P.156—159.
15. *Keeney R. L., Raiffa H.* Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. N. Y.: Wiley, 1976.
16. *Neumann J. V., Morgenstern O.* Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1953.

Сведения об авторе

Станислав Витальевич Микони

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: smikoni@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. (in Russ.)
2. Figueira G., Amorim P., Guimar L., Amorim-Lopes M., Neves-Moreira F., Almada-Lobo B. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 85–104.
3. Kar A.K. *Journal of Computational Science*, 2015, no. 6, pp. 23–33.
4. Kozhombardieva G., Burakov D.P., Khamchichev G.A. *Journal of Physics Conference*, 2022, no. 1, series 2224, pp. 1–8.
5. Sun C.C. *Expert Syst. Appl.*, 2010, vol. 37, pp. 7745–7754.
6. Prokopchina S.V. *Journal of Physics Conference*, 2020, no. 1, series 1703, pp. 012003.
7. Qiansheng Zhang and Dongfang Sun. *Journal of Physics Conference*, 2021, series 1828, pp. 012041.
8. Mikoni S.V., Garina M.I. *Proceedings of the Congress IS&IT'11*, Divnomorskoye, 3–10.09 2011, Moscow, 2011. vol. 1, pp. 33–37. (in Russ.)
9. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2002, no. 1(1), pp. 167–180. (in Russ.)
10. Mikoni S.V. *Teoriya prinyatiya upravlencheskikh resheniy* (Theory of Managerial Decision Making), St. Petersburg, 2015, 448 p. (in Russ.)
11. Velasquez M., Hester P.T. *International Journal of Operations Research*, 2013, no. 2(10), pp. 56–66.
12. Mikoni S.V., Tikhomirov V.O., Trishankov V.V., Sorokina M.I. *Regional'naya informatika-2004* (Regional Informatics-2004), Proceedings of the X Conference, 24–26.10 2006, St. Petersburg, 2006, pp. 266–273. (in Russ.)
13. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedeniye v sistemnyy analiz* (Introduction to Systems Analysis), Moscow, 1989, 367 p. (in Russ.)
14. Mikoni S.V. *Proceedings of Conf. NITE'2000*, Minsk, 2000, pp.156–159.
15. Keeney R.L., Raiffa H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, NY, Wiley, 1976.
16. Neumann J.V., Morgenstern O. *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton, NJ. Princeton University Press, 1953.

Stanislav V. Mikoni

Data on author

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: smikoni@mail.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРАЦИИ МНОГОРЕЖИМНЫХ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. ПАВЛОВ^{1,2}, А. Б. УМАРОВ^{1*}, Д. А. ПАВЛОВ¹, А. В. ГОРДЕЕВ¹

¹ Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*antropicier737@gmail.com

² Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлен подход к планированию реконфигурации сложных многорежимных объектов в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования. Предложенный подход основан на концепции комплексного (системного) моделирования, концепции параметрического генома структуры с учетом функциональных и технологических особенностей исследуемого объекта. Наряду с классической „слепой“ технологией реконфигурации рассмотрена технология структурно-функциональной реконфигурации, реализующая смену структурных состояний исследуемых объектов как при возникновении нештатных ситуаций, так и в процессе планового функционирования в целях повышения надежности и увеличения сроков функционирования объектов за счет равномерной нагрузки элементов. Проведен сравнительный анализ результатов планирования реконфигурации сложных многорежимных объектов на основе указанных технологий, продемонстрировавший преимущество технологии структурно-функциональной реконфигурации.

Ключевые слова: многорежимный сложный объект, циклограмма режимов функционирования, „слепая“ и структурно-функциональная реконфигурация, параметрический геном, комплексное моделирование

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-08-01046 в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Павлов А. Н., Умаров А. Б., Павлов Д. А., Гордеев А. В. Планирование реконфигурации многорежимных сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 802—812. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-802-812.

PLANNING THE RECONFIGURATION OF MULTI-MODE COMPLEX OBJECTS

A. N. Pavlov^{1,2}, A. B. Umarov^{1*}, D. A. Pavlov¹, A. V. Gordeev¹

¹ A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
*antropicier737@gmail.com

² St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract. An approach to planning the reconfiguration of complex multi-mode objects under conditions of a given or unknown cyclogram of operating modes is considered. The proposed approach is based on the concept of complex (system) modeling, concept of parametric genome structure, taking into account the functional and technological features of the object under study. Along with the classical "blind" reconfiguration technology, the technology of structural and functional reconfiguration is considered, which implements the change of the structural states of the studied objects both in the event of emergency situations and in the process of planned functioning in order to improve the reliability and increase the duration of the functioning of objects due to the uniform load of elements. A comparative analysis of the results of planning the reconfiguration of complex multimode objects based on these technologies is carried out, advantages of the technology of structural and functional reconfiguration are demonstrated.

Keywords: multi-mode complex object, cyclogram of functioning modes, "blind" and structural-functional reconfiguration, parametric genome, complex modeling

Acknowledgments: the work was carried out at the expense of the Russian Foundation for Basic Research (grant N 20-08-01046), within the framework of the budget theme FFZF-2022-0004.

For citation: Pavlov A. N., Umarov A. B., Pavlov D. A., Gordeev A. V. Planning the reconfiguration of multi-mode complex objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 802—812 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-802-812.

Введение. Сложность современных объектов приводит к необходимости учета различных факторов их взаимодействия с окружающей средой, что связано с увеличением числа входящих в их состав элементов и подсистем, а также, соответственно, со стремительным ростом числа внутренних связей и проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития [1—6]. Однако указанные аспекты сложности связаны не только с неопределенными воздействиями внешней среды, имеющими целенаправленный и/или нецеленаправленный характер, но и с множеством различных режимов функционирования системы, при которых взаимодействие структурных частей изменяется, что приводит к возникновению структурной динамики сложного объекта (СЛО).

При этом следует отметить, что системы с фиксированной структурой, настраиваемые обычно на установившийся (какой-то заданный) режим, не обеспечивают наилучшего качества управления в других режимах.

Для успешной реализации того или иного режима функционирования СЛО требуется, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять (перестраивать) свою структуру (структуры), состояния, параметры, способы функционирования в различных условиях обстановки. Следует отметить, что для обеспечения надежности и живучести многорежимных СЛО [4—7] широкое распространение получил такой вариант управления их структурами, как *конфигурирование и реконфигурация*.

Далее под *управлением (планированием) конфигурацией СЛО* понимается плановое изменение рабочей структуры (конфигурации) объекта для эффективного достижения поставленных целей, определенных заранее (или ситуационно) на конкретном этапе реализации режимов функционирования. В свою очередь, под *управлением (планированием) реконфигурацией СЛО* понимается процесс ситуационного изменения рабочей конфигурации объекта в целях сохранения, восстановления (повышения) до требуемого уровня значений показателей надежности и живучести при реализации режимов функционирования СЛО либо обеспечения минимального снижения уровня значений указанных показателей при деградации функций и/или выходе из строя функциональных элементов (ФЭ) и подсистем СЛО [7,8].

В связи с этим многорежимность и неопределенность условий функционирования обуславливают необходимость решения проблемы анализа и синтеза конфигурации и реконфигурации облика многорежимных СЛО, основанных на интеллектуальных подходах. При этом на этапе планирования конфигурации и реконфигурации СЛО должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций (режимов функционирования) и структур, а также, возможно, внесен такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения СЛО по целевому назначению имела бы возможность гибко реагировать на все расчетные и нерасчетные нештатные ситуации, вызывающие структурные изменения объекта.

С формальной точки зрения решение указанной проблемы возможно в рамках такого важнейшего класса современных научно-технических задач, как задачи многокритериального структурно-функционального синтеза СЛО на различных этапах их жизненного цикла [5, 6, 9]. К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием многорежимных СЛО исследован недостаточно глубоко. Поэтому задача разработки и исследования синтеза конфигурации и реконфигурации облика многорежимных СЛО различного назначения, анализ возможностей аппаратных и программных средств их реализации являются актуальными.

Вербальная постановка задачи планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. Прежде всего, отметим, что для каждой выполняемой функции или определенного набора функций (достижение целей) многорежимного СЛО может быть определена своя конкретная текущая (рабочая) конфигурация его ФЭ и режимов функционирования. Под рабочей конфигурацией понимается совокупность включенных

в состав объекта и используемых при его функционировании элементов. Тогда в зависимости от объема выполняемых функций и числа работающих ФЭ и подсистем многорежимного СЛО множество его структурных состояний может быть разделено на работоспособные, частично работоспособные и неработоспособные [5, 6].

При планировании конфигурации (реконфигурации) многорежимного СЛО требуется сформировать последовательности целевых и обеспечивающих операций, выполняемых в целях изменения рабочей конфигурации составляющих его ФЭ для эффективной реализации необходимых режимов функционирования. При этом задача планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного СЛО усложняется неизвестной циклограммой задействования режимов его функционирования.

На основании вышеприведенного описания процессов функционирования многорежимного СЛО *суть задачи планирования конфигурации и реконфигурации СЛО* сводится к следующему:

— *известно*: номенклатура элементов, входящих в состав многорежимного объекта, режимы его функционирования, задачи, выполняемые СЛО, и имеющиеся ресурсные ограничения;

— *требуется найти*: последовательность рабочих конфигураций ФЭ для обеспечения функционирования СЛО с наилучшим качеством с учетом заданных критериев в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования.

В рамках классической технологии реконфигурации СЛО, которую зачастую называют **„слепой“ реконфигурацией** [5, 6, 8], при отказах и нарушениях корректности функционирования многорежимного СЛО в целях сохранения его наиболее приоритетных функций или допустимых условий работоспособности „жертвуют“ другими функциями или частью работоспособных элементов. Однако необходимо отметить, что в ходе „слепой“ реконфигурации не проводится оценивание и анализ целевых возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций между его работоспособными элементами.

Таким образом, применительно к многорежимным СЛО реконфигурацию необходимо рассматривать как в качестве способа парирования отказов ФЭ, так и в качестве технологии управления, направленной на повышение надежности и живучести функционирования объекта. Данную технологию, в отличие от „слепой“ реконфигурации, называют **структурно-функциональной реконфигурацией** [6, 8, 9].

Важной особенностью структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО для улучшения общего целевого эффекта на максимально возможном интервале времени его активного функционирования является направленность на равномерную загрузку ФЭ и подсистем при смене конфигураций СЛО, что гарантирует его высокую надежность, живучесть и устойчивость.

Поэтому при планировании структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования требуется решить задачу выбора рабочей конфигурации ФЭ СЛО с учетом указанной особенности.

Теоретико-множественная постановка задачи планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. Для конструктивного решения задачи поиска допустимых вариантов конфигураций многорежимного СЛО, а также рациональных сценариев реконфигурации СЛО, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования [6, 8—10], предлагается следующее описание структуры выбора в условиях неопределенности и многокритериальности:

$$\left(\{M(\omega, v)\}_{v \in V}, \Delta_g(\omega), \{F_h(u), u \in \Delta_g(\omega)\}_{h \in H}, \{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}, (\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{Z}, P) \right), \quad (1)$$

где $\{M(\omega, v)\}_{v \in V}$ — комплекс моделей конфигурирования и реконфигурации СЛО в условиях неопределенности:

$M(\omega, 1)$ — модель структурно-функционального (технологического) взаимодействия ФЭ СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования на основе логико-вероятностного подхода;

$M(\omega, 2)$ — модель оценивания структурно-функциональной (технологической) надежности СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы задействования режимов функционирования на основе концепции параметрического генома структуры;

$M(\omega, 3)$ — модель оценивания живучести СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы задействования режимов функционирования и деструктивных воздействий на основе концепции параметрического генома структуры;

$M(\omega, 4)$ — модель структурно-параметрического конфигурирования СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы его функционирования с учетом равномерной загрузки ФЭ и ограниченных ресурсов;

$M(\omega, 5)$ — модель планирования реконфигурации СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы его функционирования с учетом ограниченных ресурсов.

В выражении (1) приняты также следующие обозначения: $\Delta_g(\omega)$ — множество допустимых вариантов проведения конфигурирования и реконфигурации СЛО, удовлетворяющих ограничениям на имеющиеся ресурсы, с учетом равномерной загрузки ФЭ; $\{F_h(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in \Delta_g(\omega)\}_{h \in H}$ — частные показатели качества функционирования многорежимного СЛО; $\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$ — множество согласующих правил, позволяющих задавать результирующие отношения предпочтения задачи конфигурирования и реконфигурации СЛО; $(\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{Z}, P)$ — пространство неопределенности.

Для формализации задачи поиска конфигураций и последовательностей (сценариев) реконфигураций СЛО в процессе его функционирования с учетом многорежимности введем в рассмотрение системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

$$G_\chi^t = \langle X_\chi^t, \Gamma_\chi^t \rangle, \quad (2)$$

где $\chi \in \{1, 2, 3\}$ — индекс, характеризующий тип структуры управления СЛО;

$G_1^t = \langle X_1^t, \Gamma_1^t \rangle$ — граф, описывающий технологическую структуру управления СЛО и учитывающий альтернативные варианты его функционирования, здесь X_1^t — множество вершин, отображающих режимы функционирования СЛО, Γ_1^t — множество дуг, определяющих последовательность выполнения и взаимосвязь режимов функционирования СЛО для реализации его собственных функций;

$G_2^t = \langle X_2^t, \Gamma_2^t \rangle$ — граф, описывающий техническую структуру подсистем и СЛО в целом и учитывающий альтернативные варианты рабочей конфигурации ФЭ для заданных режимов функционирования СЛО, здесь X_2^t — множество вершин, соответствующих ФЭ СЛО, Γ_2^t — множество дуг, отображающих варианты взаимодействия ФЭ для реализации заданных режимов функционирования СЛО;

$G_3^t = \langle X_3^t, \Gamma_3^t \rangle$ — граф, описывающий функциональную структуру режимов функционирования СЛО и учитывающий альтернативные варианты реализации функций ФЭ при работе в заданном режиме функционирования, здесь X_3^t — множество вершин, отображающих функции ФЭ, Γ_3^t — множество дуг, отображающих взаимосвязь и последовательность выполнения функций ФЭ для реализации заданных режимов функционирования СЛО;

$t \in \mathbb{T}$ — множество моментов времени, на котором можно выделить интервал проведения реконфигурации $T = (t_0, t_f]$.

Задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки задачи управления структурной динамикой СЛО) отображений указанных выше ДАМГ друг на друга:

$$L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t : G_{\chi}^t \rightarrow G_{\chi'}^t. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенного структурное состояние СЛО в момент времени t можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся технологическая, техническая и функциональная структуры: $S_{\delta} \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t$, $\delta = 1, \dots, K_{\Delta}$, где K_{Δ} — количество интервалов постоянства структуры.

Модели $M(\omega, 1)$, $M(\omega, 2)$, $M(\omega, 3)$, $M(\omega, 4)$ необходимы для описания многоструктурного макросостояния СЛО, включающего техническую, функциональную и технологическую структуры, для вычисления значений интегральных показателей структурно-функциональной надежности и живучести СЛО, а также поиска допустимых вариантов конфигураций в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования и деструктивных воздействий с учетом равномерной загрузки ФЭ и ограниченных ресурсов.

В основе описанных выше моделей лежит предложенная авторами концепция параметрического генома структуры многорежимных СЛО [10].

Параметрическим геномом структуры является параметрический вектор коэффициентов однородного полинома структурной надежности [11], который содержит в концентрированном виде структурно-топологические свойства исследуемого многорежимного СЛО и позволяет вычислить потенциальные значения показателей надежности и живучести функционирования объекта в условиях как известной, так и неизвестной технологии задействования режимов.

Формальное описание и результаты применения моделей $M(\omega, 1)$, $M(\omega, 2)$, $M(\omega, 3)$, $M(\omega, 4)$ приведены в работах [10, 12—16].

Рассмотрим модель $M(\omega, 5)$ планирования реконфигурации СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования с учетом ограниченных ресурсов.

Введем множество допустимых отображений многоструктурных состояний СЛО друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'}. \quad (4)$$

При этом предполагается, что каждое состояние СЛО в момент времени t задается в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры.

Введем следующее допущение. Структурное макросостояние СЛО характеризуется временными интервалами постоянства, при этом его изменение может происходить автоматически при парировании нештатной ситуации; принудительно, по инициативе оператора, осуществляющего управление объектом.

Каждому подынтервалу $(t_{\delta}, t_{\delta+1}]$ соответствует структурное состояние СЛО $S_{\delta} \in S = \{S_1, \dots, S_{K_{\Delta}}\}$. Возникновение ситуаций, связанных с динамикой структур СЛО, вызвано появлением нештатной ситуации из-за сбоев (или отказов) ФЭ, а также выполнением поставленной задачи. Такие ситуации сопровождаются переходом из текущего структурного состояния S_{δ} в новое структурное состояние $S_{\delta+1}$.

Тогда структурную динамику СЛО с учетом проведения конфигурирования и реконфигурации объекта можно интерпретировать как последовательность (композицию) отображе-

ний вида (4) во времени: $Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta'', \delta' \rangle}^{t_f}$, при которой обеспечиваются требуемые значения показателей надежности и живучести функционирования СЛО.

Таким образом, формально процесс планирования структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО может быть представлен как поиск наиболее предпочтительной последовательности $Y_*^{t_f}$ проведения конфигурирования и реконфигурации СЛО:

$$\Phi_p \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow_{Y^{t_f} \in \Delta_g} \text{extr};$$

$$\Delta_g = \left\{ Y^{t_f} \mid Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta'', \delta' \rangle}^{t_f}; W_k \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t \right) \leq W_k^3; k = \overline{1, \Psi} \right\}, \quad (5)$$

где Φ_p — показатель или набор показателей, характеризующих надежность и живучесть функционирования СЛО, W_k^3 — заданные значения имеющегося ресурса.

Результаты планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. В качестве многорежимного СЛО рассмотрим систему управления движением и навигации (СУДН) малого космического аппарата (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [17—19]. Режимы функционирования данной системы могут быть следующие режимы ориентации МКА: R_1 — целевой режим ориентации МКА, R_2 — режим солнечной ориентации, R_3 — режим сброса кинетического момента, R_4 — режим выдачи корректирующего импульса.

Схема функциональной целостности чувствительных элементов и режимов ориентации представлена на рис. 1 [11], где основные функциональные вершины схемы отображают следующие состояния: 1—4 — работоспособность одноосных измерителей угловой скорости: ОИУС₁—ОИУС₄; 5, 6 — работоспособность оптических солнечных датчиков: ОСД₁, ОСД₂; 7, 8 — работоспособность приборов ориентации на Землю: ПОЗ₁, ПОЗ₂; 9, 10 — работоспособность звездных датчиков: ЗД₁, ЗД₂; 11—14 — потребность в режимах R_1 — R_4 соответственно; вершины 15—33 являются фиктивными и отображают реальные логические взаимосвязи элементов СУДН МКА.

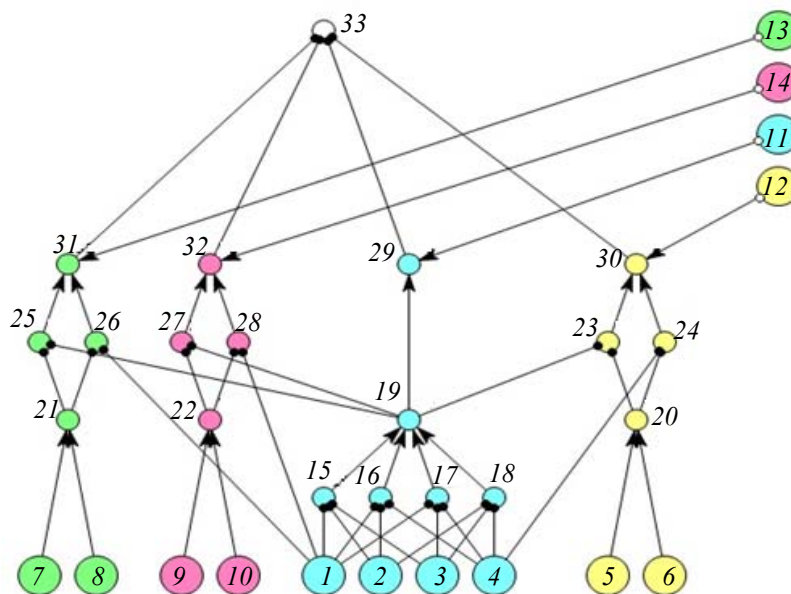


Рис. 1

Исходные данные для планирования:

— вероятность безотказной работы (ВБР) для каждого ФЭ СУДН МКА на начальный момент времени представлена в табл. 1;

— изменения значений ВБР элементов СУДН МКА после первого и последующих интервалов времени, характеризующихся постоянством структуры, представлены в табл. 2, при этом предполагается, что снижение ВБР по каждому из элементов одинаковое;

— для имитации сбоев ФЭ (бортовой аппаратуры), возникающих в системе, в зависимости от наработки на отказ предлагается воспользоваться следующим выражением:

$$\xi_i(t) = \begin{cases} 0, & p_i(t) \leq p_i^3, \\ 1, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad p_i^3 = 0,15, \quad i = 1, \dots, 10;$$

— энергопотребление ФЭ СУДН МКА на каждом интервале, см. табл. 1;

— энергоресурс на каждом интервале равен 115 Вт.

Таблица 1

ФЭ _{1–10}	ВБР	Энергопотребление, Вт
ОИУС ₁	0,955	11,0
ОИУС ₂	0,955	11,0
ОИУС ₃	0,973	15,0
ОИУС ₄	0,973	15,0
ОСД ₁	0,973	15,0
ОСД ₂	0,973	15,0
ПОЗ ₁	0,957	4,5
ПОЗ ₂	0,957	4,5
ЗД ₁	0,95	16,5
ЗД ₂	0,993	52,0

Таблица 2

Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВБР	0,18	0,33	0,55	0,70	0,82	0,86	0,91	0,94	0,96	0,98

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием технологии „слепой“ и структурно-функциональной реконфигурации в условиях неизвестной циклограммы задействования режимов ориентации, отражены в табл. 3, 4. Представлены задействованные ФЭ СУДН МКА ДЗЗ при использовании указанных технологий, а на рис. 2 приведены значения интегральных оценок надежности функционирования СУДН МКА в условиях неизвестной циклограммы задействования режимов ориентации.

Таблица 3

ФЭ _{1–10}	Интервал											Остаточная ВБР
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
ОИУС ₁												0,135
ОИУС ₂												0,135
ОИУС ₃												0,113
ОИУС ₄												0,113
ОСД ₁												0,113
ОСД ₂												0,113
ПОЗ ₁												0,137
ПОЗ ₂												0,957
ЗД ₁												0,130
ЗД ₂												0,993
Интегральная надежность	0,8389	0,3478	0,1781	0,0667	0,0166	0,0990	0,0657	0,0432	0,0187	0,0078	0,0024	

Таблица 4

ФЭ _{1—10}	Интервал								Остаточная ВБР
	1	2	3	4	5	6	7	8	
ОИУС ₁									0,135
ОИУС ₂									0,135
ОИУС ₃									0,113
ОИУС ₄									0,113
ОСД ₁									0,423
ОСД ₂									0,113
ПОЗ ₁									0,137
ПОЗ ₂									0,627
ЗД ₁									0,130
ЗД ₂									0,663
Интегральная надежность	0,8389	0,4958	0,4552	0,2829	0,2066	0,1229	0,0231	0,0112	

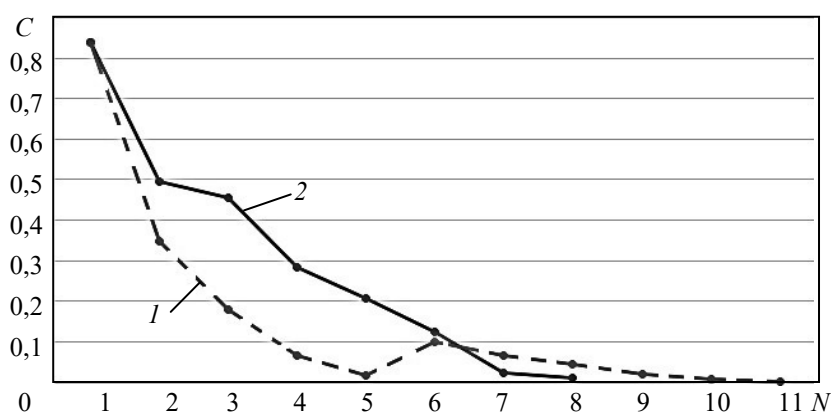


Рис. 2

Проанализируем результаты реконфигурации СУДН МКА ДЗЗ. Как видно из графика на рис. 2, интегральный показатель надежности функционирования системы (C) в случае использования технологии „слепой“ реконфигурации (кривая 1) принимает меньшие значения, чем при структурно-функциональной реконфигурации (кривая 2), на каждом из рассматриваемых интервалов (N) функционирования системы до 6-го интервала включительно.

Важно отметить, что применение „слепой“ реконфигурации обеспечивает, как видно, более продолжительный срок частичной работоспособности системы (возможно выполнение режима R_2) — до 11-го интервала. Тем не менее „выигрышным“ данный вариант реконфигурации назвать нельзя, так как начиная с 6-го интервала не будет реализован основной режим целевой ориентации.

Оценка средней интегральной надежности выполнения всех режимов ориентации СУДН на 6 интервалах времени дает следующие результаты: 0,4004 — в случае применения структурно-функциональной реконфигурации и 0,2414 — при „слепой“ реконфигурации. Тогда относительный выигрыш при использовании технологии структурно-функциональной реконфигурации достигает 60 %.

Закключение. В процессе функционирования сложных многорежимных объектов для сохранения требуемого (а иногда и повышения текущего) уровня значений показателей надежности и живучести необходимо осуществлять конфигурирование и реконфигурацию объекта с учетом многорежимности, неопределенных деструктивных воздействий, равномерности задействования ФЭ и ограниченных ресурсов.

В работе предложен подход к планированию реконфигурации многорежимных СЛО, основанный на анализе структурно-функциональных свойств объекта в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов его функционирования, а также показаны преимущества этой технологии перед классической „слепой“ реконфигурацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S. Y.* Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // Intern. Journal of Production Research. 2016. Vol. 54, N 23. P. 6969—6983.
2. *Theorin A.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // Intern. Journal of Production Research. 2016. P. 1297—1311.
3. *Mehdi Jafari.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 47. P. 467—472.
4. *Черкесов Г. Н., Недосекин А. О., Виноградов В. В.* Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // Надежность. 2018. № 2(18). С. 17—24.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М., Стыскин М. М., Джао В. Ю.-Д.* Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 187—190.
6. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
7. *Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N.* Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production // Intern. Journal of Production Research. 2017. Vol. 55, N 5. P. 1368—1385.
8. *Павлов А. Н.* Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. № 5(28). С. 143—168.
9. *Pavlov A. N., Vorotyagin V. N., Pavlov D. A., Zakharov V. V.* Methodology of Structural-Functional Synthesis for the Small Spacecraft Onboard System Appearance // Stability and Control Processes, SCP 2020; Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proc. of the 4th Intern. Conf. Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov. Cham: Springer, 2022. P. 687—694.
10. *Павлов А. Н., Павлов Д. А., Алешин Е. Н., Воротягин В. Н., Умаров А. Б.* Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных многорежимных объектов // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2021. № 677. С. 186—194.
11. *Поленин В. И., Рябинин И. А., Свиринов С. К., Гладкова И. А.* Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: Монография / Под ред. А. С. Можаяева. СПб: Рег. отд. РАЕН, 2011. 416 с.
12. *Павлов А. Н., Воротягин В. Н., Кулаков А. Ю., Умаров А. Б.* Исследование структурно-функциональной надежности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // Информатизация и связь. 2020. № 4. С. 156—164.
13. *Павлов А. Н., Павлов Д. А., Умаров А. Б.* Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Тр. МАИ. 2021. № 120. С. 1—29.
14. *Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin, A. B. Umarov* // Proc. Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020), St. Petersburg, Russian Federation, Dec. 11—12, 2020. CEUR-WS 2021. Vol. 2803. P. 61—66.
15. *Pavlov A. N., Umarov A. B., Aleshin Ye. N.* Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate // Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021. CEUR-WS 2021. Vol. 2924. P. 1—8.
16. *Павлов А. Н., Павлов Д. А., Умаров А. Б., Гордеев А. В.* Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта // Информатика и автоматизация. 2022. № 4(21). С. 812—845.
17. *Methodology for supporting and making decisions on equipping the onboard equipment of a small spacecraft's motion control system / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin, A. Yu. Kulakov* // Intern. Journal Risk Assessment and Management. 2021. Vol. 24, N 2/2/4. P. 126—139.
18. *Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В., Ткаченко С. И., Бакланов А. И., Салмин В. В., Семкин Н. Д., Ткаченко И. С., Горячкин О. В.* Опыт-технологический малый космический аппарат „АИСТ-2Д“. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

19. Шипов М. Г. Гашение угловых скоростей КА „Аист-2Д“ с использованием системы сброса кинетического момента // Вестн. Самар. ун-та. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2019. № 2(18). С. 121—127.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Павлов** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: pavlov62@list.ru
- Александр Бахтиёрович Умаров** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; E-mail: antropicier737@gmail.com
- Дмитрий Александрович Павлов** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ; преподаватель; E-mail: dpavlov239@mail.ru
- Андрей Владимирович Гордеев** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; E-mail: grd611@bk.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 23.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

- Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y. *International Journal of Production Research*, 2016, no. 23(54), pp. 6969–6983.
- Theorin A. *International Journal of Production Research*, 2016, pp. 1297–1311.
- Mehdi J. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 467–472.
- Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. *Reliability-2018*, 2018, no. 2(18), pp. 17–24. (in Russ.)
- Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M., Styskin M. M., Gao Un.-D. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 187–190. (in Russ.)
- Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring the State and Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
- Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. *International Journal of Production Research*, 2017, no. 5(55), pp. 1368–1385.
- Pavlov A.N. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2013, no. 5(28), pp. 143–168. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Pavlov D.A., Zakharov V.V. *Stability and Control Processes. SCP 2020. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Proc. of the 4th Intern. Conf. Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov, Springer, Cham, 2022, pp. 687–694.
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2021, no. 677, pp. 186–194 (in Russ.)
- Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primeneniye obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voyennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva* (Application of the General Logical-Probabilistic Method for the Analysis of Technical, Military Organizational and Functional Systems and Armed Confrontation), St. Petersburg, 2011, 416 p. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Kylakov A.Yu., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Informatization and communication*, 2020, no. 5, pp. 132–140. (in Russ.)
- Pavlov A., Pavlov D., Umarov A. *Trudy MAI*, 2021, no. 120, pp. 1–29. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020)*, St. Petersburg, Dec. 11–12, 2020, EUR-WS 2021, vol. 2803, pp. 61–66.
- Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. *Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021*, EUR-WS 2021, vol. 2924, pp. 1–8.
- Pavlov A., Pavlov D., Umarov A., Gordeev A. *Informatics and Automation*, 2022, no. 4(21), pp. 812–845. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Kulakov A.Yu. *International Journal Risk Assessment and Management*, 2021, vol. 24, pp. 126–139.
- Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskiiy malyy kosmicheskiiy apparat "AIST-2D"* (Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D"), Samara, 2017, 324 p. (in Russ.)
- Shipov M.G. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2019, no. 2(18), pp. 121–127. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander N. Pavlov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: pavlov62@list.ru

-
- | | | |
|----------------------------|---|--|
| Alexander B. Umarov | — | Post-Graduate Student; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes;
E-mail: antropicier737@gmail.com |
| Dmitry A. Pavlov | — | PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Tools for Complex Processing and Transmission of Information in Automated Control System; Lecturer; E-mail: dpavlov239@mail.ru |
| Andrey V. Gordeev | — | Post-Graduate Student; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; E-mail: grd611@bk.ru |

Received 18.07.2022; approved after reviewing 23.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОСТНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНОСТЬЮ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

И. Т. КИМЯЕВ^{1*}, А. В. СПЕСИВЦЕВ²

¹Норникель Спутник, Москва, Россия
*igor95a@mail.ru

²Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается пример создания подсистемы принятия управленческих решений в общей структуре поддержания вертикально-интегрированных объектов хозяйственной деятельности в работоспособном состоянии как элемента комплексно и целенаправленно усложняемой архитектуры информационно-управляющих систем. Представленный подход базируется на разрабатываемой авторами методологии управления сложностью, которая положена в основу методического подхода, обосновывающего порядок плановой и эволюционной замены на производственных объектах лиц, принимающих решения, на функционально эквивалентные информационно-управляющие программно-аппаратные комплексы. Одним из наиболее эффективных методов формирования прозрачного механизма принятия управленческих решений, способного стать основным „решающим ядром“ (базой знаний) для подобных комплексов, является „нечетко-возможностный подход“ (НВП). Эффективность данного подхода заключается в возможности с использованием экспертной информации восстановить сложную многосвязную функциональную зависимость между актуальными производственно-технологическими характеристиками исследуемого процесса и принимаемыми на их основе управленческими решениями. Приведен пример создания управляющей модели базы знаний для процесса с „кипящим слоем“.

Ключевые слова: объект управления, интегрированная система управления, человеческий фактор, нечетко-возможностный подход, „печь кипящего слоя“, управление сложностью

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Кимяев И. Т., Спесивцев А. В. Нечетко-возможностный подход к управлению сложностью интегрированных информационно-управляющих систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 813—817. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-813-817.

FUZZY-POSSIBILISTIC APPROACH TO MANAGING THE COMPLEXITY OF INTEGRATED INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

I. T. Kimyaev^{1*}, A. V. Spesivtsev²

¹LLC Nor Nickel Sputnik, Moscow, Russia
*igor95a@mail.ru

²St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia

Abstract. An example of creating a subsystem of managerial decision-making in the general structure of maintaining vertically integrated objects of economic activity in a working state as an element of a complex and purposefully complicated architecture of information and control systems is considered. The proposed approach is based on the complexity management methodology developed by the authors, which justifies the order of systematic and evolutionary replacement of decision makers at production facilities with functionally equivalent information-control software and hardware complexes. One of the most effective methods of forming a transparent mechanism for managerial decision-making that can become the main "decisive core" (knowledge base) for such complexes is the "fuzzy-possibilistic approach". The effectiveness of this approach lies in the possibility of using expert information to restore a complex multi-connected functional relationship between the actual production and technological characteristics of the process under study and management decisions made on their basis. An example of creating a knowledge base of control model for a process with a "fluidized bed" is given.

Keywords: control object, integrated control system, human factor, fuzzy-possibility approach, fluidized bed furnace, complexity control

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the budget theme FFZF-2022-0004.

For citation: Kimyaev I. T., Spesivtsev A. V. Fuzzy-possibilistic approach to managing the complexity of integrated information and control systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 813—817 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-813-817.

Введение. Производственная-технологическая компания в современном мире — это сложный объект хозяйственной деятельности (ОХД), в состав которого входит множество связанных материальными и энергетическими потоками объектов управления (ОУ), сгруппированных в физические, территориальные и/или функционально-логические домены (ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016).

Функционирование ОХД в целом и каждого отдельного ОУ обеспечивается двумя составляющими [1, 2]: материально-энергетической и организационно-информационной, включающими вертикальные и горизонтальные материальные, энергетические, финансовые и другие потоки информации с множеством обратных связей (рециклов). Непрерывную, согласно единым критериям, работу данных составляющих обеспечивает организационно-управленческий аппарат, состоящий из лиц, принимающих решения (ЛПР), которые выполняют целенаправленную обработку внутренних и внешних информационных потоков и вырабатывают актуальные управляющие воздействия.

Для более корректной и своевременной обработки многоуровневых информационных потоков ЛПР активно используют интегрированные информационно-управляющие системы (ИУС) требуемой, согласно принципу необходимого разнообразия, сложности.

Современные условия ведения хозяйственной деятельности, влияющие на процесс проектирования структуры ОХД ↔ интегрированная ИУС, формируют запрос на планомерное и целенаправленное снижение доли „человеческого фактора“, особенно на производственно-технологическом уровне. Это связано с тем, что ошибочные решения, принимаемые ЛПР, несут риск возникновения аварий и/или радикального снижения эффективности работы как отдельных ОУ, так и ОХД в целом.

Для создания эффективной интегрированной ИУС необходимы количественно-качественные многомерные модели как входящих в ОХД объектов и систем, так и окружающей их реальности. Данные модели включают информационные потоки в ОХД и интегрированных ИУС и имеют наименование „цифровых двойников“ (ЦД). Для сложных ОХД синтезировать полнофункциональный комплекс ЦД ↔ интегрированная ИУС с учетом их многокритериальности, множества явных и неявных обратных связей, внешних воздействий и других факторов, используя существующие методологические и методические подходы, не представляется возможным.

Практика показывает, что творческие и когнитивные способности ЛПР с соответствующей квалификацией наилучшим образом применимы при решении управленческих задач, характеризующихся существенной неопределенностью текущего состояния производственно-технологического процесса и многокритериальностью при выборе целей и способов его ведения.

Отметим, что на сегодня отсутствуют количественные и/или качественные интегральные метрики по оценке возможности частичной или полной замены функций ЛПР отдельными компонентами интегрированной ИУС в виде операционно- и/или информационно-технологических подсистем (ОТ- или ИТ-подсистем).

Таким образом, формирование подходов и методологической базы для выбора уровня сложности ЦД, разработка метрик и процедур по рациональному и сбалансированному перераспределению управляющих функций между ЛПР и ОТ- или ИТ-подсистемами в процессе эволюции комплекса ОХД ↔ интегрированная ИУС — актуальная научно-техническая проблема.

Методологические подходы к управлению сложностью интегрированной ИУС. Эволюционная трансформация типов таких систем в зависимости от количества охватываемых компонентов ОХД, сложности ЦД, насыщенности обрабатываемых ОТ- или ИТ-подсистемами информационных потоков и требований к качеству управления системами предполагает необходимость управления данным неоднородным процессом (развитием).

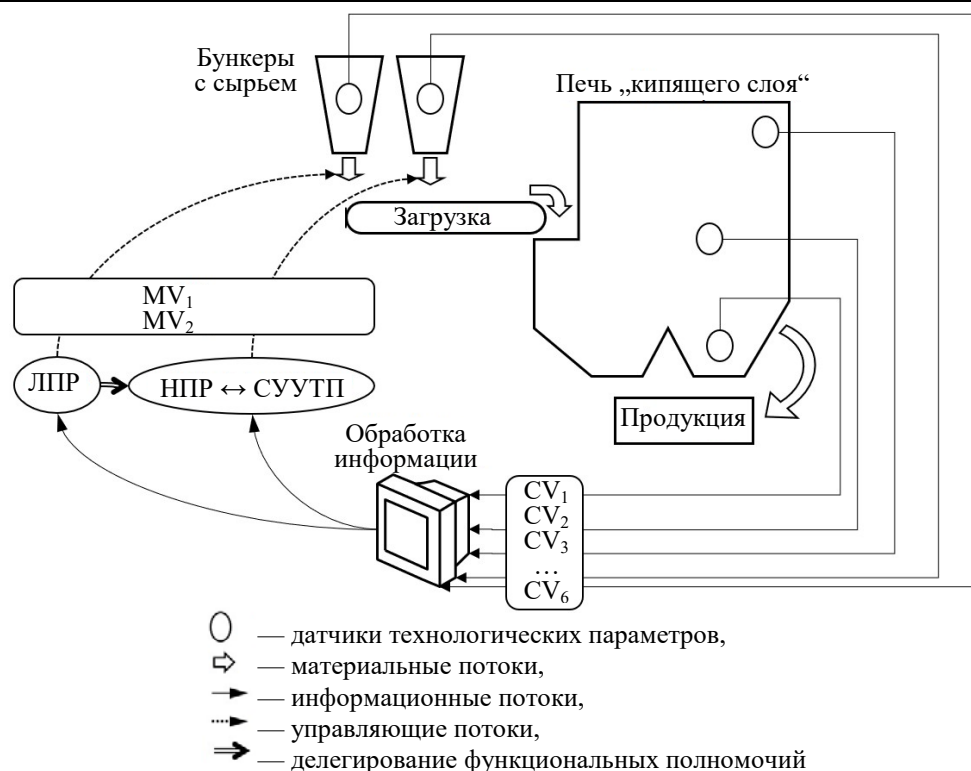
Традиционный способ повышения качества управления ОХД и его отдельными объектами состоит в их последовательном насыщении множеством источников количественных данных о состоянии физических показателей (контролируемых переменных — Controlled Variable — CV), о действующих возмущениях (Disturbance Variable — DV) и о допустимых управляющих воздействиях (Manipulated Variable — MV). Посредством наиболее подходящего математического аппарата для отдельных ОУ, технологических линий и производственных доменов создаются ЦД той или иной сложности (см. ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016, а также [1, 3]), в которых количественные CV-, DV- и MV-векторы являются входными/выходными характеристиками.

Одним из успешных современных методологических приемов по замене ЛПР как функционального управленческого компонента на эквивалентную ОТ-подсистему является создание систем управления классов Advanced Process Control (APC) и Real Time Optimizer (RTO), в русскоязычной среде имеющих наименование „Системы усовершенствованного управления технологическими процессами“ (СУУТП) и „Системы глобальной динамической стабилизации“ (СГДО).

В свою очередь, одним из эффективных способов синтеза „управляющего ядра“ для СУУТП как компонента интегрированной ИУС является методика алгоритмизации принятия управленческих решений на базе нечетко-возможностного подхода (НВП) [4, 5]. НВП позволяет, с использованием знаний ЛПР о способах безопасного и эффективного ведения ОУ во всем многообразии производственно-технологических ситуаций, с высокой достоверностью восстановить функцию принятия управленческих решений в виде нечеткого полинома. Восстановленная таким образом функция, т.е. как база знаний (БЗ), становится „управляющим ядром“ так называемого нечеткого логического регулятора (НЛР).

В [6, 7] приведен пример создания интеллектуальной системы управления класса СУУТП конкретным технологическим объектом „печь кипящего слоя“ (ПКС), назначение которого — заместить управляющие функции ЛПР (см. рисунок). „Управляющее ядро“ данной СУУТП посредством НВП, на основе знаний оператора-технолога об управлении ПКС, по векторам $CV_{1,...,n}$ и $MV_{1,...,m}$ (в формулах для упрощения записи — cv) синтезировано как БЗ НЛР [4] в виде следующих зависимостей (представлены только значимые коэффициенты):

$$\begin{aligned} MV_1 = & 12,56 + 0,77cv_1 + 1,31cv_2 - 0,95cv_3 - 2,1cv_4 - 1,43cv_6 - 0,73cv_1cv_2 + \\ & + 1,12cv_1cv_3 + 1,83cv_1cv_4 - 1,15cv_1cv_6 - 1,72cv_2cv_3 - 1,24cv_2cv_4 - 0,75cv_2cv_5 - \\ & - 0,9cv_3cv_5 - 1,22cv_3cv_4 + 0,56cv_5cv_6 - 1,19cv_1cv_2cv_4 - 0,72cv_1cv_2cv_3 - \\ & - 0,55cv_1cv_5cv_6 - 0,53cv_2cv_4cv_6 - 1,63cv_2cv_3cv_6 - 1,23cv_3cv_4cv_6; \\ MV_2 = & 4,8 + 1,4cv_2 - 0,55cv_6 - 0,52cv_1cv_2cv_4 - 0,58cv_1cv_2cv_3 - 0,55cv_2cv_3cv_6. \end{aligned}$$



Заключение. Показана необходимость разработки методологии и технологии эволюционной автоматизации и интеллектуализации деятельности лиц, принимающих решения, как естественной управляющей подсистемы в целях создания и планомерного их замещения на эквивалентные логико-динамические модельно-алгоритмические комплексы в контурах управления ОХД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вивчарь Р. М., Птушкин А. И., Соколов Б. В. Риск-ориентированное управление созданием организационно-технических систем на основе использования имитационных моделей их функционирования // Вестн. ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. С. 1—15.
2. Sokolov B. V., Yusupov R. M. Scientific Basis of Management and Cybernetics Methodologies Integration // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. N 442 LNNS. P. 52—59.
3. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: Монография М.: Изд-во РАН, 2018. 314с.
4. Спесивцев А. В. Нечетко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояний сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 985—994.
5. Kimyaev I. T., Spesivtsev A. V. Ontological and Fuzzy-Possibility Approach to the Synthesis of the DM Functional Equivalent for Management of Hierarchical Systems // Artificial Intelligence Trends in Systems, CSOC 2022: Conf. Proc., Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 502. Cham: Springer [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9_53>.
6. Кимяев И. Т. Интеллектуальная система управления процессом обжига сульфидного никелевого концентрата в кипящем слое (на примере печи обжигового цеха Никелевого завода ОАО „Норильская горная компания“): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001.
7. Исследование закритических областей факторного пространства при управлении обжигом в кипящем слое с помощью нечеткой управляющей модели / И. Т. Кимяев, З. Г. Салихов, А. В. Спесивцев, А. В. Дроздов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2001. № 1. С. 74—78.

Сведения об авторах

Игорь Тимофеевич Кимяев

— канд. техн. наук; ООО „Норникель Спутник“; архитектор;
E-mail: igor95a@mail.ru

Александр Васильевич Спесивцев — д-р техн. наук, доцент; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: sav2050@gmail.com

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 30.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Vivchar R.M., Ptushkin A.I., Sokolov B.V. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2021, no. 2, pp. 1–15. (in Russ.)
2. Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Scientific Basis of Management and Cybernetics Methodologies Integration*, 2022, vol. 442, LNNS, pp. 52–59.
3. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
4. Spesivtsev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 11(63), pp. 985–995. (in Russ.)
5. Kimyaev I.T., Spesivtsev A.V. *Artificial Intelligence Trends in Systems. CSOC 2022*, Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2022, vol. 502, https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9_53/.
6. Kimyaev I.T. *Intellektual'naya sistema upravleniya protsessom obzhiga sul'fidnogo nikellevogo kontsentrata v ki-pyashchem sloye (Na primere pechi Obzhigovogo tsekha Nikelevogo zavoda OAO «Noril'skaya gornaya kompa-niya»)* (Intelligent Control System for the Process of Roasting Nickel Sulfide Concentrate in a Fluidized Bed (On the Example of the Furnace of the Roasting Shop of the Nickel Plant of OJSC Norilsk Mining Company)), Candidate's thesis, Moscow, 2001. (in Russ.)
7. Kimyaev I.T., Salikhov Z.G., Spesivtsev A.V., Drozdov A.V. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tsvetnaya Metallurgiya*, 2001, no. 1, pp. 74–77.

Data on authors

Igor T. Kimyaev — PhD; LLC Nor Nickel Sputnik; Architect; E-mail: igor95a@mail.ru
Alexander V. Spesivtsev — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: sav2050@gmail.com

Received 18.07.2022; approved after reviewing 30.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ КОРМОВ

А. И. СЕМЕНОВ*, А. Ю. КУЛАКОВ

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

**alekssemyenov1996@gmail.com*

Аннотация. Заготовка кормов из трав рассматривается как сложный технико-технологический процесс. Конечный продукт, в данном случае заготовка силоса, может быть получен с использованием разных вариантов технологий кормопроизводства. Представлен подход к выбору наиболее приемлемого варианта технологий и планов производства кормов из трав на основе логико-динамических и нечетко-возможностных моделей. Разработанный комплекс моделей и алгоритмов позволяет с системно-кибернетических позиций описать и исследовать существующие взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав при переводе объекта управления (сельскохозяйственного предприятия, производящего корма) из заданного исходного состояния в заданное конечное в зависимости от конкретных сценариев изменения внешних условий. В качестве основных внешних условий рассматриваются факторы, связанные с агробиологическими, временными, климатическими, экономическими и организационными ограничениями. Для решения задач предложены нечетко-возможностные модели оценивания урожайности кормовых угодий и качества выращенной кормовой массы. При анализе эффективности процессов кормопроизводства важным вопросом является многокритериальное оценивание качества, а также соответствующих программ проактивного управления процессом заготовки силоса с учетом следующих показателей: своевременности выполнения операций при различных условиях, степени равномерности использования ресурсов и общего времени заготовки кормов из трав. Предложены оригинальный математический анализ рассматриваемых процессов и алгоритмы решения задач прогнозирования и планирования заготовки кормов.

Ключевые слова: модельно-алгоритмическое обеспечение, логико-динамические модели, нечетко-возможностный подход, экспертные знания, проактивное управление, проактивное планирование, кормопроизводство

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Семенов А. И., Кулаков А. Ю. Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 818—825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.

MODEL AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR FORECASTING AND PLANNING THE FORAGE HARVESTING PROCESS

A. I. Semyonov*, A. Yu. Kulakov

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,

St. Petersburg, Russia

**alekssemyenov1996@gmail.com*

Abstract. Harvesting of grass forage is considered as a complex technical and technological process. The final product, in this case a silage billet, can be obtained using different variants of feed production technologies. An approach to choosing the most acceptable variant of technologies and plans for the production of grass feed based on logical-dynamic and fuzzy-probability models is presented. The developed set of models and algorithms makes it possible to describe and investigate the existing interconnected multi-stage processes of grass feed production from a system-cybernetic standpoint when transferring a management object (an agricultural enterprise producing feed) from a given initial state to a given final state, depending on specific scenarios of changing external conditions. Factors related to agrobiological, temporal, climatic, economic and organizational constraints are considered as the main external conditions. To solve the problems, fuzzy-probability models for estimating the yield of forage lands and the quality of the grown fodder mass are proposed. When analyzing the effectiveness of feed production processes, an important issue is the multi-criteria assessment of quality, as well as the corresponding programs for proactive management of the silage har-

vesting process, taking into account the following indicators: the timing of operations under various conditions, the degree of uniformity of resource use and the total time of harvesting grass feed. An original mathematical analysis of the processes under consideration and algorithms for solving problems of forecasting and planning forage harvesting are proposed.

Keywords: model-algorithmic support, logical-dynamic models, fuzzy-possibility approach, expert knowledge, proactive control, proactive planning, fodder production

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the budget theme FFZF-2022-0004.

For citation: Semyonov A. I., Kulakov A. Yu. Model and algorithmic support for forecasting and planning the forage harvesting process. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 818—825 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.

По уровню использования информационных технологий в сельском хозяйстве Россия занимает 45-е место в мире, что связано с высокой стоимостью оборудования и отсутствием научных основ [1].

Под информатизацией и интеллектуализацией, в частности процессов сельскохозяйственных производств, понимается разработка и внедрение специального программно-математического и информационного обеспечения проактивного и управления сложными объектами и процессами, в качестве которых в настоящей статье рассматривается производство кормов из трав.

На сельскохозяйственных предприятиях Северо-Западного региона РФ доля затрат кормов в себестоимости молока и мяса составляет до 70 % [2]. Поэтому исследования по повышению эффективности сельскохозяйственных производств кормов из трав и снижению их себестоимости являются весьма актуальными. Предпосылками к этому служит существующая в настоящее время возможность повышения эффективности производства кормов, потенциал которого составляет 30—40 %. Данный потенциал может быть реализован за счет ликвидации нарушений в сроках уборки трав, а также совершенствования технологий изготовления и хранения кормов [3].

Процесс производства кормов из трав (на примере заготовки силоса) состоит из следующих этапов: основная обработка почвы, внесение органических и минеральных удобрений, подготовка семян к посеву, предпосевная обработка почвы, посев семян трав, уход за растениями и уборка трав. Выполнение каждого этапа зависит от целого ряда условий, к числу которых относятся временные, климатические, технические, агробиологические и финансовые ограничения.

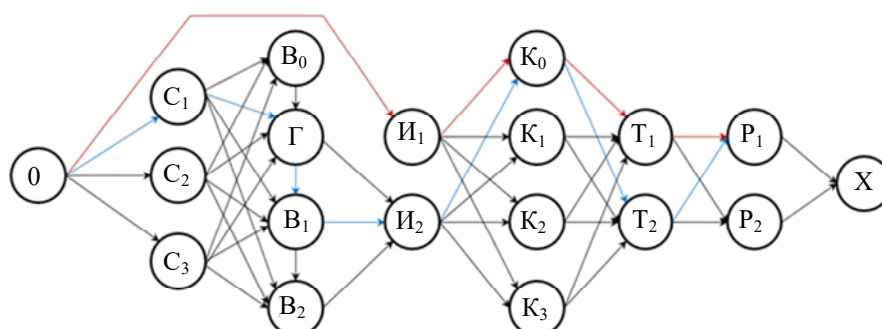
Следует отметить достаточно значительное внимание исследователей к математическому моделированию в сельском хозяйстве, однако, в сущности, большинство работ нацелено на изолированное решение локальных задач частных производств сельскохозяйственной продукции [2—6]. Это в итоге приводит к использованию эвристических методов и алгоритмов, которые не могут обеспечить требуемый уровень качества управления кормопроизводством. Проведенный анализ показывает [7—13], что задача разработки комплексных прогнозов и планов производства рассматриваемой сельскохозяйственной продукции с формальной точки зрения может быть сведена к решению взаимосвязанных задач динамического многокритериального структурно-функционального синтеза технологий производства кормов из трав, а также к задачам оптимизации программ управления материальными, энергетическими и информационными потоками и ресурсами для реализации выбранных технологий.

Для решения перечисленных задач необходимо, в первую очередь, разработать комплекс логико-динамических моделей программного управления разномасштабными взаимосвязанными операциями и гетерогенными ресурсами, используемыми при производстве кормов из трав, на основе функционально-стоимостного и сервис-ориентированного подходов. Данные модели позволят с системно-кибернетических позиций описать и исследовать

взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав с учетом конкретных сценариев изменения внешних условий.

Цель настоящей статьи — постановка и формальное описание задачи планирования процессов использования материальных ресурсов и выполнения соответствующих технологических операций на этапе уборки трав для заготовки силоса на основе разработанных логико-динамических и нечетко-возможностных моделей.

Этап уборки трав на силос состоит из четко регламентированных по времени процессов, включающих такие операции, как скашивание, ворошение, сгребание, прессование, внесение консерванта, транспортировка и хранение [14]. В зависимости от климатических, агробиологических, пространственно-временных, технико-технологических, экономических и организационных ограничений заготовка силоса может быть осуществлена с использованием различных технологических операций. Варианты технологий уборки трав на силос представлены на рисунке, где приняты следующие обозначения: 0 — травостой; C_1 — скашивание, C_2 — скашивание с плющением стеблей, C_3 — скашивание с перебиванием стеблей; B_0 — ворошение в прокосе, Γ — сгребание в валки, B_1 — ворошение валка, B_2 — ворошение валка вторичное; I_1 — скашивание с измельчением, I_2 — подбор с измельчением; K_0 — этап без внесения консервантов, K_1 — внесение химических консервантов, K_2 — внесение биологических консервантов (заквасок), K_3 — введение электрохимического активированного раствора; T_1 — транспортировка тракторами, T_2 — транспортировка автомобилями; P_1 — закладка на хранение в траншею, P_2 — закладка на хранение в башни; X — силос (корм из трав).



При формальном описании системы кормопроизводства следует понимать, что рассматриваемая система характеризуется нелинейностью, нестационарностью происходящих в ней процессов, большой размерностью, неопределенностью, а также требует использования многокритериального подхода при выборе наиболее предпочтительных технологий кормопроизводства [4, 6].

Использование гетерогенных ресурсов на различных этапах кормопроизводства, увлажненность травостоя, почвенно-климатические условия и квалификация персонала — все эти условия и ограничения в итоге оказывают влияние на выбор технологии и плана заготовки кормов и соответствующих моделей, их описывающих. Вместе с тем достаточно ясно, что на различных этапах жизненного цикла производства рассматриваемого вида сельскохозяйственной продукции важно уметь упреждающе оценивать ее планируемую урожайность в целях реализации максимально возможного потенциала имеющихся либо синтезируемых технологий заготовки кормов при соблюдении всех агробиологических требований [4—6].

В настоящей работе предлагается использовать новый комплекс логико-динамических моделей (ЛДМ) для решения как задач прогнозирования и оценивания урожайности кормовых угодий, так и задач выбора предпочтительного варианта технологии и плана заготовки силоса [9—11]. В этом случае формальная постановка перечисленных задач должна включать в себя следующие элементы.

Пусть $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ — множество типов полей, подлежащих уборке;
 $K_k^i = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ — множество операций по уборке силоса на выбранном поле, к операциям K_k^i относятся операции скашивания, ворошения, сгребания, внесения консервирующих добавок, подбор трав, выбор средств транспортировки и выбор места хранения;
 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ — множество ресурсов для уборки силоса, имеющихся в хозяйстве. В этом случае можно ввести следующие ЛДМ:

$$\begin{aligned}
 M^{(0)} = & \left\{ u(t) \mid \dot{x}_{ik} = \sum_{r=1}^n e_{ik}(t) u_{ikr}; \quad \dot{x}_r = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l u_{ikr}; \right. \\
 & x_{ik}(t_0) = 0; \quad x_{ikr}(t_f) = a_{kr}; \\
 & \sum_{r=1}^n u_{ikr} \leq P_k \forall i, \forall k; \quad \sum_{k=1}^l u_{ikr} \leq P_r \forall i, \forall r; \\
 & u_{ikr}(t) \in \{0, 1\}; \\
 & \left. \sum_{r=1}^n u_{ikr} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} (a_{i\tilde{\alpha}} - x_{i\tilde{\alpha}}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} (a_{i\tilde{\beta}} - x_{i\tilde{\beta}}(t)) \right] = 0, \right. \\
 & \left. i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l; r = 1, \dots, n \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где x_{ik} — переменная, характеризующая состояние выполнения операции K_k^i в ходе реализации процесса производства силоса; $e_{ik}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с возможностью использования ресурса R для выполнения операции K_k^i : $e_{ik}(t) = 1$, если соответствующие ограничения выполняются, и $e_{ik}(t) = 0$ в противном случае; $u_{ikr} = 1$, если операции K_k^i должны выполняться с помощью одного из ресурсов, входящих в множество R , и $u_{ikr} = 0$ в противном случае; x_r — переменная, характеризующая время задействования ресурса R ; $a_{i\tilde{\alpha}}$, $a_{i\tilde{\beta}}$ — заданные объемы операций, которые входят в варианты реализации технологий производства силоса; $\Gamma_{ik1}, \Gamma_{ik2}$ — множество номеров операций, проводимых в рамках операции K_k^i , а также непосредственно предшествующих и технологически связанных с ней с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“; P_k, P_r — заданные константы, характеризующие технико-технологические ограничения, связанные с возможностью использования тех или иных материальных и энергетических ресурсов при выполнении различных операций по производству силоса.

Качество выполнения программ проактивного управления процессом заготовки силоса можно оценить с помощью следующих показателей [10]:

$$J_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{r=1}^n \int_{t_0}^{t_f} a_{ikr}(\tau) u_{ikr}(\tau); \tag{2}$$

$$J_2 = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^l \left[t_f - x_r(t_f) \right]^2; \tag{3}$$

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_f} d\tau; \quad (4)$$

$$J_{об} = \lambda_1 J_1 + \lambda_2 J_2 + \lambda_3 J_3, \quad (5)$$

где J_1 — функционал, с помощью которого оценивается „своевременность“ выполнения операций при различных условиях; a_{ikr} — заданная гладкая функция времени, которая применяется для „штрафа“ за нарушение директивных сроков выполнения соответствующей операции, входящей в граф, представленный на рисунке; J_2 — функционал, введенный для оценивания степени равномерности использования ресурсов R , имеющихся в хозяйстве; J_3 — функционал, введенный для оценивания общего времени заготовки кормов из трав; $J_{об}$ — обобщенный функционал, введенный для оценивания общего качества выполнения планируемых работ (операций).

Отметим, что нарушение заранее определенных сроков способно привести к потерям более 30 % качества кормов [3].

Приведем обобщенный алгоритм планирования производства кормов из трав (в том числе, и для этапа уборки трав для заготовки силоса).

Шаг 1.1. Разработка пессимистических, стандартных и оптимистических сценариев функционирования сельскохозяйственного предприятия (СхП) в различных условиях:

— задание пространственно-временных и организационных ограничений (задаются различные сценарии изменения матричной функции $e_{ik}(t)$);

— моделирование процессов кормопроизводства, а также расчет различных технико-технологических характеристик соответствующего СхП (например, путем варьирования констант P_k, P_r).

Шаг 1.2. Многоэтапное решение задач динамического многокритериального синтеза программ перевода рассматриваемого СхП из заданного начального состояния в заданное конечное при различных исходных данных (реализация технологии проактивного планирования). Подробно с особенностями реализации данных этапов можно ознакомиться в работах [10—13].

Шаг 1.3. Фаззификация полученных значений показателей качества на основе чисел L-R типа. Крайние значения нечетко-возможностной шкалы задаются с учетом полученных ранее значений $J_{об}$ для оптимистических и пессимистических сценариев [14—16].

В результате проведения численных экспериментов синтезируются не только наиболее приемлемые программы технологии, но и планы проведения работ по заготовке кормов из трав (в том числе, силоса, см. рисунок).

В условиях неопределенности (прежде всего, связанных с погодно-климатическими факторами), присущей сельскохозяйственной деятельности, предлагается при построении модели прогнозирования и оценивания урожайности кормов опираться на логико-динамический и нечетко-возможностный подходы, а также алгоритм, базирующийся на синтезе элементов теории управления, теории нечетких множеств, теории планирования экспериментов [15, 16]. В рамках данных подходов и теорий следует учитывать как знания и опыт высококвалифицированных специалистов-экспертов на этапе оценивания потенциальной урожайности, так и возможные последствия, вызванные воздействием различных факторов неопределенности на результаты кормопроизводства.

При синтезе нечетко-возможностной модели прогнозирования и оценивания урожайности кормов требуется в первую очередь учитывать факторы, системно влияющие на эффективность кормопроизводства. В этом случае факторное пространство разрабатываемой модели будет

включать количественные и не количественные (качественные) четкие и нечеткие лингвистические переменные, из которых формируется полином следующего вида:

$$Y = 10,56 + 2,35z_1 + 4,39z_2 + 3,18z_3 + 1,28z_4 + 1,35J_{06} - 0,43z_1z_3 + 0,79z_2z_3 - 0,41z_2J_{06} + 0,92z_3J_{06} - 0,37z_1z_3z_4 + 0,93z_1z_3J_{06}, \quad (6)$$

где z_1 — параметр (фактор), характеризующий агробиопотенциал угодий, z_2 — погодноклиматические условия, z_3 — технологический ресурс (качество кормов из трав), z_4 — энергетический ресурс; значение J_{06} — обобщенного показателя качества выполнения работ — может быть получено с использованием логико-динамической модели вида $M^{(0)}$ (см. формулу (1)).

Перечисленные выше переменные факторного пространства представляют собой, по сути, агрегированные показатели. Так, наиболее значимый управляемый фактор z_3 соответствует используемому технологическому ресурсу, который, в свою очередь, зависит от шести факторов (переменных), определяющих особенности их реализации. К ним относятся переменные, характеризующие фазу вегетации (k_{31}), вид скашивания (k_{32}), количество и интенсивность ворошений (k_{33}), внесение консерванта (k_{34}), способ досушивания (k_{35}) и способ хранения (k_{36}). Значения $k_{31}, \dots, k_{36}$ могут быть получены на этапе решения задачи программного управления (см. шаг 1.1 алгоритма), т.е. при синтезе оптимальных планов и комбинированных технологий производства кормов из трав.

Модель технологического ресурса z_3 , определяющего качество кормов, имеет следующий вид:

$$z_3 = 8,859 + 0,703k_{31} + 0,109k_{32} + 0,172k_{33} + 0,359k_{34} + 0,140k_{35} + 0,359k_{36} - 0,109k_{34}k_{35} - 0,131k_{31}k_{34}k_{36} - 0,109k_{32}k_{33}k_{35}. \quad (7)$$

В моделях (6) и (7) приведены только значимые коэффициенты, а переменные представлены в безразмерном стандартизованном масштабе, что дает возможность проведения их сравнительного анализа.

Анализируя модель (7), можно отметить ее нелинейность и зависимость от трех технологических факторов (способ хранения, фаза вегетации и внесение консервантов), которые оказывают наибольшее влияние на значение общего параметра, характеризующего состояние технологического ресурса.

С учетом вышеизложенного обобщенный алгоритм прогнозирования и оценивания урожайности кормовых угодий состоит из следующих этапов.

Шаг 2.1. Разработка пессимистических и оптимистических сценариев функционирования СхП, занимающегося заготовкой кормов из трав.

Шаг 2.2. Решение комплекса задач динамического многокритериального синтеза технологий и программ заготовки кормов из трав для пессимистических, стандартных и оптимистических сценариев развития внешней обстановки.

Шаг 2.3. Фаззификация значений обобщенных показателей качества, полученных для перечисленных условий.

Шаг 2.4. Использование нечетко-возможностных моделей для оценивания и прогнозирования урожайности кормовых угодий для выбранных сценариев изменения внешних условий.

Итак, заготовка кормов из трав в данном исследовании рассматривается как сложный технико-технологический процесс. Разработаны комплексы моделей и алгоритмов программного управления, позволяющие с системно-кибернетических позиций исследовать взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав и оценивать урожайность угодий. Комбинированное использование предложенных логико-динамических и нечетко-возможностных математических моделей может послужить основой для создания методики комплексного оценивания урожайности кормов, а также синтеза программ управления процессом их заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вартанова М. Л., Дробот Е. В. Перспективы цифровизации сельского хозяйства как приоритетного направления импортозамещения // Экономические отношения. 2018. Т. 8, № 1.
2. Валге А. М., Еремин М. А., Сухопаров А. И. Методика моделирования технологического процесса заготовки кормов из трав // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства: Теоретический и научно-практический журнал. 2018. № 4, вып. 97. С. 115—126.
3. Тихомиров И. А., Скоркин В. К., Аксенова В. П., Андрюхина О. Л. Повышение эффективности производства продукции молочного и мясного скотоводства на основе совершенствования технологии кормления // Вестн. ВНИИМЖ. 2017. №1(25). С. 70—77.
4. Popov V. D., Spesivtsev A. V., Sukhoparov A. I., Spesivtsev V. A. Convolution of multi-criteria expert estimates in a context of uncertainty // Proc. of the 20th IEEE Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements. 2017. P. 203—206.
5. Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A., Spesivtsev V. Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // Proc. 19th Intern. Sci. Conf. „Engineering for Rural Development“, Jelgava, Latvia, May 20—22, 2020. P. 773—777.
6. Башилов А. М., Королев В. А., Арженовский А. Г., Глобин А. Н., Глечикова Н. А. Проактивное моделирование динамической сложности агротехноценозов // Вестн. аграрной науки Дона. 2020. № 3 (51). С. 45—53.
7. Marino R., Tomei P. Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Contr. 1998. Vol. 43. P. 84—89. DOI:10.1109/9.654892.
8. Охмилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 162—174.
9. Sokolov B. V., Pavlov A. N., Potriasaev S. A., Zakharov V. V. Methodology and Technologies of the Complex Objects Proactive Intellectual Situational Management and Control in Emergencies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. 1156 AISC. P. 234—243.
10. Захаров В. В. Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 975—984.
11. Sokolov B. V., Potriasaev S. A., Yusupov R. M. Proactive Management of Information Processes in the Industrial Internet // Journal of Physics: Conf. Series. 2021. N 1864 (1). P. 012—007.
12. Gnidenko A.S., Vladislav S.A., Sokolov B.V., Potriasaev S.A. Methodology and integrated modeling technologies for synthesis of cyber-physical production systems modernization programs and plans // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52. P. 642—647.
13. Sokolov B. V., Verzilin D. N., Zaychik E. M. Models and an Algorithm for Multi-Criteria Synthesis of Control Technologies Managing Information Systems of Virtual Enterprises // Proc. 22nd European Conf. on Modelling and Simulation. 2008. DOI:10.7148/2008-0048.
14. Спесивцев А. В., Сухопаров А. И., Спесивцев В. А., Семенов А. И. Многофакторная свертка экспертной информации при оценивании сельскохозяйственных технологий на основе явных и неявных экспертных знаний // Мягкие измерения и вычисления. 2021. № 7. С. 23—32.
15. Drozdov A. V., Spesivtsev A. V. Formalization of expert information in the logical-linguistic description of complex systems // Journal of Computer and Systems Sciences Intern. 1995. N 33(4). P. 76—83.
16. Спесивцев А. В. Мягкие измерения и мягкие вычисления при моделировании состояния сложных объектов на базе экспертных знаний // Управление в условиях неопределенности: Монография / Под общ. ред. С. В. Прокопчиной. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2017. С. 217—263.

Сведения об авторах

Александр Игоревич Семенов

— аспирант; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com

Александр Юрьевич Кулаков

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. научный сотрудник; E-mail: russ69@bk.ru

REFERENCES

1. Vartanova M.L., Drobot E.V. *Creative economy. Economic relations*, 2018, no. 1(8). (in Russ.)
2. Valge A.M., Eremin M.A., Sukhoparov A.I. *Technologies and technical means of mechanized production of crop products*, 2018, no. 97, pp. 115–126. (in Russ.)
3. Tikhomirov I.A., Skorkin V.K., Aksenova V.P., Andryukhina O.L. *Vestnik vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*, 2017, no. 1(25), pp. 70–77. (in Russ.)
4. Popov V.D., Spesivtsev A.V., Sukhoparov A.I., Spesivtsev V.A. *Proceedings of 2017 20th IEEE Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*, 2017, pp. 203–206.
5. Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A., Spesivtsev V. *Proceedings of the 19th Intern. Scientific Conf. Engineering for Rural Development*, Jelgava, May 20–22, 2020, vol. 19, pp. 773–777.
6. Bashilov A.M., Korolev V.A., Arzhenovskiy A.G., Globin A.N., Glechikova N.A. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2020, no. 3(51), pp. 45–53. (in Russ.)
7. Marino R., Tomei P. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89, DOI:10.1109/9.654892.
8. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 1(162), pp. 162–174.
9. Sokolov B.V., Pavlov A.N., Potriasaev S.A., Zakharov V.V. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1156 AISC, pp. 234–243.
10. Zakharov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 11(63), pp. 975–984. (in Russ.)
11. Sokolov B.V., Potriasaev S.A., Yusupov R.M. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1(1864), pp. 012–007.
12. Gnidenko A.S., Vladislav S.A., Sokolov B.V., Potriasaev S.A. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, pp. 642–647.
13. Sokolov B.V., Verzilin D.N., Zaychik E.M. *Proceedings 22nd European Conf. on Modelling and Simulation*, 2008, DOI:10.7148/2008-0048.
14. Spesivtsev A.V., Sukhoparov A.I., Spesivtsev V.A., Semenov A.I. *Soft Measurements and Computing*, 2021, no. 7, pp. 23–32 (in Russ.)
15. Drozdov A.V., Spesivtsev A.V. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1995, no. 4(33), pp. 76–83.
16. Spesivtsev A.V. *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti* (Management under Uncertainty), St. Petersburg, 2017, pp. 217–263. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander I. Semyonov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling;
E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com
- Alexander Yu. Kulakov** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher;
E-mail: russ69@bk.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUPPORT OF INFORMATION SYSTEMS

УДК 004.912: 004.822
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-826-832

ФОРМИРОВАНИЕ ЯДРА ДОКУМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

С. В. КУЛЕШОВ, А. А. ЗАЙЦЕВА*, А. Ю. АКСЕНОВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

**cher@iiias.spb.su*

Аннотация. Рассматриваются особенности разработки систем интернет-мониторинга открытого типа с неограниченным количеством источников в условиях ограниченного объема систем хранения собранных данных. Цель работы — решение задачи формирования множества документов минимально необходимого размера (ядра документов), отвечающего требованиям репрезентативности и вариативности тем при мониторинге сети Интернет. Для формализации и решения поставленной задачи разработана теоретико-множественная модель ядра документов. Предложенный подход отличается использованием вытесняющего алгоритма, поддерживающего в базе данных наличие только актуальных документов в пределах доступного объема системы хранения данных. Приведены результаты эксперимента с использованием реальных данных, подтверждающие применимость разработанной модели. Предложенный подход может быть использован в ряде практических задач, в частности для поиска в сети Интернет сведений (документов, страниц), по которым отсутствует априорная информация, необходимая для поиска по ключевым словам.

Ключевые слова: *ядро документов, мониторинг, краулер, поиск документов, интернет-ресурсы*

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2022 г., № FFZF-2022-0005.

Ссылка для цитирования: Кулешов С. В., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю. Формирование ядра документов в системах интернет-мониторинга в условиях ресурсных ограничений // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 826—832. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-826-832.

FORMATION OF THE CORE OF DOCUMENTS IN INTERNET MONITORING SYSTEMS UNDER RESOURCE CONSTRAINTS

S. V. Kuleshov, A. A. Zaytseva*, A. Yu. Aksenov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia*

**cher@iiias.spb.su*

Abstract. The features of development of open-type Internet monitoring systems with an unlimited number of sources in conditions of a limited amount of data storage systems are considered. The purpose of the work is to solve the problem of forming a set of documents of the minimum required size (the core of documents) that meets the requirements of representativeness and variability of topics when monitoring the Internet. To formalize and solve the problem, a set-theoretic model of the document core is developed. The proposed approach is distinguished by the use of a preemptive algorithm that supports the availability of only relevant documents in the database within the available volume of the data storage system. The results of an experiment using real data confirming the applicability of the devel-

oped model are presented. The proposed approach can be used in a number of practical tasks, in particular for searching the Internet for information (documents, pages) for which there is no a priori information needed for keyword search.

Keywords: core of documents, monitoring, crawler, document search, Internet resources

Acknowledgment: the work was carried out as part of the implementation of the State Task for 2022, N FFZF-2022-0005.

For citation: Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. Yu. Formation of the core of documents in Internet monitoring systems under resource constraints. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 826—832 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-826-832.

Технологии сбора данных в сети Интернет в настоящее время являются технологиями общего назначения, решающими широкий спектр практических задач. Если в начале развития интернет-сетей краулер (программный робот, используемый для обнаружения новых страниц в Интернете, их загрузки и анализа) являлся определяющим признаком поисковой системы, то на нынешнем уровне развития Всемирной паутины эта технология используется даже в небольших проектах, требующих получения актуальных данных из внешних источников.

Большинство практических задач решаются с использованием „закрытого“ (closed domain) мониторинга, при котором сбор данных ведется по конечному списку ресурсов либо конкретному набору документов (мониторинг социальных сетей [1], анализ бизнес-активности конкурентов [2], агрегирование новостей [3], анализ общественного мнения, аналитика изменения цен [4] и тому подобные задачи). Проблема решения задач при ограниченных ресурсах памяти рассматривалась, например, в [5—7] и до сих пор является актуальной, несмотря на все возрастающую емкость систем хранения данных.

Системы сбора данных открытого типа не ограничены конкретным списком ресурсов и могут работать, собирая все доступные документы путем анализа ссылок на уже известные документы, постоянно расширяя список обработанных документов [8—10]. В англоязычной литературе подобные системы сбора данных иногда называются data harvesters [11]. Такие системы сталкиваются с проблемой ограниченных ресурсов, которые могут проявляться как в нехватке пропускной способности сети и вычислительной мощности серверов для обработки постоянно растущей очереди входящих документов, так и в принципиальной ограниченности систем хранения данных (СХД) для размещения постоянно увеличивающегося объема информации [12].

В условиях ограниченных ресурсов возможны различные подходы к решению указанных проблем. Традиционно используется фильтрация контента по различным критериям [13—15], позволяющим на этапе предобработки исключать часть документов из списка, предназначенного для сохранения в СХД. Данный подход позволяет исключать документы, бесполезные с точки зрения решаемой задачи, из очереди размещения в СХД. В зависимости от задачи это могут быть рекламные страницы, форумы, социальные сети, сайты магазинов, ресурсы на иностранном языке, фото- и видео- хостинги и др.

В ситуации когда фильтрация контента не позволяет преодолеть проблему постепенного переполнения СХД (в случаях когда доступных для обработки документов потенциально больше, чем возможностей для их хранения) приходится решать задачу формирования минимально необходимого множества документов (назовем данное множество ядром), производя постепенное замещение документов, признанных неподходящими по заранее заданному критерию, на новые в процессе работы системы мониторинга.

Таковыми критериями могут быть новизна, степень релевантности документа заданной теме, полнота представления темы имеющимися документами, а также эвристические

критерии, позволяющие оценить субъективные факторы, такие, например, как полезность документа для человека или качество самого документа.

Данный подход применим в ряде практических задач, в частности для поиска в сети Интернет сведений (документов, страниц), по которым отсутствует априорная информация, необходимая для поиска по ключевым словам. Это может быть информация о новых научных направлениях, новых технологиях, новинках на рынках продукции, интересных фактах из области общественной жизни, политики, экономики. Соответственно, требуется разработка вытесняющих алгоритмов обновления ядра, учитывающих не только временную метку документа, но и показатель его полезности, рассчитываемый по результатам внутреннего ранжирования.

На основании вышеизложенного в настоящей статье решается задача формализации построения ядра документов как задача построения отображения $A \rightarrow K$, где A — множество всех документов, доступных в Интернете в открытом доступе, имеющих URL (уникальный адрес документа или ресурса в сети Интернет), K — множество документов, входящих в ядро и сохраняемых в СХД.

Введем дополнительные обозначения:

L — множество „legasy“ документов, т.е. документов, содержащихся в ядре, но отсутствующих в интернет-доступе по тем же URL;

R — множество документов, размещение которых в ядре нецелесообразно: документы рекламного характера; документы, содержащие запрещенный законодательством контент; документы специального вида, имеющие целью поисковую оптимизацию (SEO-оптимизацию);

U — множество всех имеющихся в момент времени t_{current} документов в сети Интернет;

D — множество загруженных системой документов d на момент времени t_{current} , $K \subseteq D \subseteq U$.

Множество U служит для теоретической верхней оценки полноты ядра. Полнота ядра может быть оценена как $|K|/|G|$, где $\forall d_i \in G$, если $\forall d \in U, d \notin R$.

В связи с тем, что ядро, как и сам Интернет, является динамически меняющейся структурой, все вышеперечисленные множества определены в момент времени t_{current} :

$$K \cup L = D_{t-1}, \quad D \cap A = K.$$

В свою очередь, множество K делится на подмножества K_1 — актуализированных и K_2 — не актуализированных на данной итерации алгоритма документов:

$$K = K_1 \cup K_2.$$

На рис. 1 отображено графическое представление теоретико-множественной модели принципа формирования ядра документов и работы вытесняющего алгоритма.

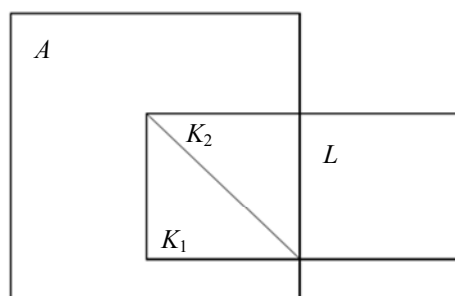


Рис. 1

Множество документов ядра (множество K) должно формироваться при следующих условиях:

— минимизируется дублирование документов:

$$\forall d_i \in K, d_j \in K, \lim_{t \rightarrow \infty} |d_i \equiv d_j| \rightarrow 0;$$

— минимизируется количество „legacy“ документов $\lim_{t \rightarrow \infty} |L| \rightarrow 0$;

— условие ограниченных ресурсов системы хранения данных выражается в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |K| \rightarrow k_{\max},$$

т.е. количество документов, входящих в ядро, не должно превышать возможности системы, ограниченной техническими ресурсами ($k_{\max}$ — максимальное количество документов для СХД).

Для доменов удовлетворительного качества все документы должны присутствовать в максимальном объеме, для доменов плохого качества (с низким суммарным показателем качества документов) наличие документов в ядре должно быть минимальным.

Предложенный подход основан на вытесняющем алгоритме, который, используя очередь документов, подлежащих обработке (множество K_1), последовательно проверяет каждый документ на актуальность (если документ уже есть в множестве D) либо пытается разместить его в ядре документов K (если документ имеется в множестве A , но ранее не загружался и не размещался в СХД, т.е. не принадлежит множеству D).

При работе алгоритма используется комплексная эвристическая функция $e(d)$ оценки качества документа [13]:

$$e(d) = \begin{cases} \text{true, если документ } d \text{ удовлетворяет требованиям качества,} \\ \text{false, если иначе,} \end{cases}$$

которая позволяет классифицировать документы перед помещением их в ядро.

За одну итерацию каждый известный домен обрабатывается один раз, при этом показатель качества q домена M пересчитывается после каждой итерации:

$$q(M) = \min \left(100, 1 + \frac{n_{\text{good}}}{|M|} \right),$$

где $n_{\text{good}} = |G|$ — количество документов, признанных качественными, т.е. $\forall d \in G: e(d) = \text{true}$; $|M|$ — общее количество документов, загруженных для данного домена (мощность множества M).

Значение порога вытеснения документов Q определяется после каждой итерации на основе вычисления объема документов, значение показателя качества домена $q(M)$ которых больше заданного.

Итоговое решающее правило на каждой итерации алгоритма для документа d имеет следующий вид:

— новый документ принадлежит ядру (помещается на хранение в СХД) $d \in K$, если $d \notin L \vee d \notin R \vee e(d) = \text{true}$;

— документ исключается из ядра, если $d \in L \vee d \in M_i, q(M_i) < Q$.

Условие минимизации дублирования документов в ядре достигается за счет дополнительных алгоритмов поиска схожих документов во время каждой итерации алгоритма замещения.

Проведенный с использованием реальных данных эксперимент показал применимость предложенного алгоритма для поддержания актуальной коллекции (ядра) документов в процессе непрерывного мониторинга вновь появляющихся документов без превышения ограничения на количество хранимых экземпляров документов, накладываемого системой хранения данных. На рис. 2 приведен график фактического распределения количества замещаемых документов (N) при различных значениях Q , полученных в результате экспериментальной проверки.

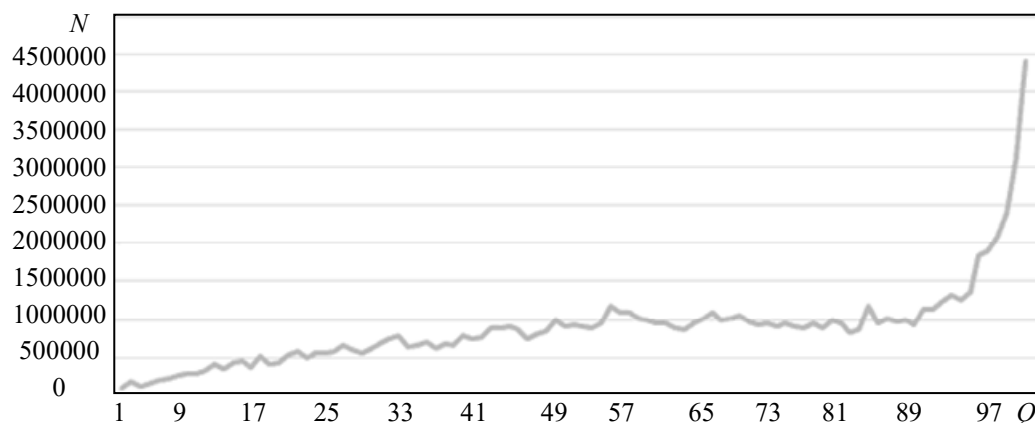


Рис. 2

Выводы. В статье решена задача формализации построения ядра документов в системах интернет-мониторинга в условиях ограниченного объема СХД. Предложенный подход отличается использованием вытесняющего алгоритма, поддерживающего в базе данных наличие только актуальных документов в пределах доступного объема СХД.

Использование данного подхода позволяет поддерживать актуальное состояние ядра документов в СХД ограниченного объема, не превышая заданное количество $k_{\max}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zachlod C., Samuel O., Ochsner A., Werthmüller S. Analytics of social media data – state of characteristics and application // Journal of Business Research. 2022. Vol. 144, P. 1064—1076. DOI: 10.1016/j.jbusres.2022.02.016.
2. Fink C., Toivonen T., Correia R. A., Di Minin E. Mapping the online songbird trade in Indonesia // Applied Geography. 2021. P. 134. DOI:10.1016/j.apgeog.2021.102505.
3. Han H., Wang C., Zhao Y., Shu M., Wang W., Min Y. SSLE: A framework for evaluating the “Filter bubble” effect on the news aggregator and recommenders // World Wide Web. 2022. N 25(3). P. 1169—1195. DOI: 10.1007/s11280-022-01031-4.
4. Krewinkel A., Sünkler S., Lewandowski D. et al. Concept for automated computer-aided identification and evaluation of potentially non-compliant food products traded via electronic commerce // Food Control. 2016. N 61, P. 204—212. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.09.039.
5. Беляевский К. О. Формирование октодерев по облаку точек при ограничении объема оперативной памяти // Научно-технический вестник СПбПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12, № 4. С. 97—110.
6. Puzak T.R. Analysis of Cache Replacement-Algorithms: Doctor’s Thesis. 1985.
7. Wilson P. R. et al. Dynamic storage allocation: A survey and critical review // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 1995. Vol. 986. P. 1—116.
8. Laliwala Z., Shaikh A. Web Crawling and Data Mining with Apache Nutch. Packt Publ., 2013.

9. Nasraoui O. Web data mining: exploring hyperlinks, contents, and usage data // ACM SIGKDD Explorations Newsletter. 2008.
10. Van den Broucke S., Baesens B. From Web Scraping to Web Crawling. Practical Web Scraping for Data Science. Berkeley, CA: Apress, 2018. P. 155—172.
11. Alkalbani A. M., Hussain W., Kim J. Y. A Centralised Cloud Services Repository (CCSR) Framework for Optimal Cloud Service Advertisement Discovery from Heterogenous Web Portals // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 128213—128223. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939543.
12. Wu Z., Cai Z., Tang, X., Xu Y., Deng T. A forward and backward private oblivious RAM for storage outsourcing on edge-cloud computing // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2022. Vol. 166. P. 1—14. DOI: 10.1016/j.jpdc.2022.04.008.
13. Зайцева А. А., Кулешов С. В., Михайлов С. Н. Метод оценки качества текстов в задачах аналитического мониторинга информационных ресурсов // Тр. СПИИРАН. 2014. Вып. 37. С. 144—155.
14. Кулешов С. В., Зайцева А. А., Левашкин С. П. Технологии и принципы сбора и обработки неструктурированных распределенных данных с учетом современных особенностей предоставления медиа-контента // Информатизация и связь. 2020. № 4. С. 62—66.
15. Kuleshov S., Zaytseva A., Aksenov A. Natural Language Search and Associative-Ontology Matching Algorithms Based on Graph Representation of Texts // Intelligent Systems Applications in Software Engineering, CoMeSySo 2019; Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 1046. P. 7—26. DOI 10.1007/978-3-030-30329-7_26.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Сергей Викторович Кулешов | — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; гл. научный сотрудник;
E-mail: kuleshov@iias.spb.su |
| Александра Алексеевна Зайцева | — канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; ст. научный сотрудник;
E-mail: cher@iias.spb.su |
| Алексей Юрьевич Аксенов | — канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; ст. научный сотрудник;
E-mail: a_aksenov@iias.spb.su |

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 27.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Zachlod C., Samuel O., Ochsner A., & Werthmüller S. *Journal of Business Research*, 2022, vol. 144, pp. 1064—1076, DOI: 10.1016/j.jbusres.2022.02.016.
2. Fink C., Toivonen T., Correia R. A., & Di Minin E. *Applied Geography*, 2021, pp. 134, DOI: 10.1016/j.apgeog.2021.102505.
3. Han H., Wang C., Zhao Y., Shu M., Wang W., & Min Y. *World Wide Web*, 2022, no. 3(25), pp. 1169—1195, DOI: 10.1007/s11280-022-01031-4.
4. Krewinkel A., Sünkler S., Lewandowski D. et al. *Food Control*, 2016, vol. 61, pp. 204—212, DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.09.039.
5. Beliaevskii K.O. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Computing, Telecommunications and Control*, 2019, no. 4(12), pp. 97—110. (in Russ.)
6. Puzak T.R. *Analysis of Cache Replacement-Algorithms*, Doctor's thesis, 1985.
7. Wilson P.R. et al. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1995, vol. 986, pp. 1—116.
8. Laliwala Z., Shaikh A. *Web Crawling and Data Mining with Apache Nutch.*, Packt Publishing, 2013.
9. Nasraoui O. *Computer Science*, 2008, DOI:10.1145/1540276.1540281.
10. Van den Broucke S., Baesens B. *From Web Scraping to Web Crawling. Practical Web Scraping for Data Science*, Apress – Berkeley, CA, 2018, pp. 155—172.
11. Alkalbani A.M., Hussain W. & Kim J.Y. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 128213—128223, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939543.
12. Wu Z., Cai Z., Tang, X., Xu Y., & Deng T. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2022, vol. 166, pp. 1—14, DOI:10.1016/j.jpdc.2022.04.008.
13. Zaitseva A.A., Kuleshov S.V., Mikhailov S.N. *Trudy SPIIRAN (SPIIRAS Proceedings)*, 2014, no. 37, pp. 144—155. (in Russ.)
14. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Levashkin S.P. *Informatization and communication*, 2020, no. 5, pp. 22—28. (in Russ.)
15. Kuleshov S., Zaytseva A., Aksenov A. *Systems Applications in Software Engineering. CoMeSySo 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 1046, pp. 7—26, DOI 10.1007/978-3-030-30329-7_26.

Data on authors

- Sergey V. Kuleshov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Research Automation Laboratory; Chief Researcher; E-mail: kuleshov@iiias.spb.su
- Alexandra A. Zaytseva** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Research Automation Laboratory; Senior Researcher; E-mail: cher@iiias.spb.su
- Alexey Yu. Aksenov** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Research Automation Laboratory; Senior Researcher; E-mail: a_aksenov@iiias.spb.su

Received 18.07.2022; approved after reviewing 27.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

**МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИИ СОБЫТИЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Д. А. ЛЕВШУН

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
gaifulina@comsec.spb.ru*

Аннотация. Для решения задачи корреляции событий информационной безопасности предложена модель комбинированного применения интеллектуальных методов корреляции. Интеллектуальные методы корреляции событий безопасности способны анализировать как объемные исторические данные, так и события в реальном времени, а также автоматически обнаруживать изменяющиеся пороговые значения. Предложенная модель содержит два уровня обработки данных: уровень представления знаний и уровень корреляции событий безопасности. На уровне представления знаний осуществляется структурный и семантический анализ событий. На уровне корреляции для обработки событий применяются оценка подобия элементов векторов событий безопасности, нейросетевой графо-ориентированный метод и анализ данных при помощи рекуррентных нейронных сетей. Результаты работы модели являются последовательность взаимосвязанных событий безопасности, тип текущего состояния безопасности системы и прогнозируемые состояния. Эффективность подхода на основе предложенной модели проиллюстрирована результатами эксперимента по прогнозированию событий безопасности системы, показывающими низкие значения показателя ошибок.

Ключевые слова: корреляция событий, информационная безопасность, мониторинг состояния безопасности, интеллектуальный анализ данных

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0007.

Ссылка для цитирования: Левшун Д. А. Модель комбинированного применения интеллектуальных методов корреляции событий информационной безопасности // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 833—841. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-833-841.

**MODEL OF COMBINED APPLICATION OF INTELLIGENT METHODS
OF INFORMATION SECURITY EVENTS CORRELATION**

D. A. Levshun

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
gaifulina@comsec.spb.ru*

Abstract. To solve the problem of information security event correlation, a model for the combined use of intelligent correlation methods is proposed. Intelligent security event correlation methods are able to analyze both historical data and real-time events and automatically detect changing thresholds. The proposed model contains two levels of data processing: the level of knowledge representation and the level of security event correlation. At the level of knowledge representation, structural and semantic analysis of events is carried out. At the correlation level, the similarity assessment of elements of security event vectors, a graph-oriented neural network method and data analysis using recurrent neural networks are used for event processing. The results of the model are the sequence of interrelated security events, the type of the current security state of the system and the predicted states. The performance of the approach based on the proposed model is illustrated by results of an experiment on predicting system security events, showing low values of the error indicator.

Keywords: event correlation, information security, security monitoring, data mining

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the budget theme FFZF-2022-0007.

For citation: Levshun D. A. Model of combined application of intelligent methods of information security events correlation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 833—841 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-833-841.

Введение. Современные вычислительные системы и сети в больших объемах генерируют данные для аналитики информационной безопасности (ИБ). В свою очередь, инструменты безопасности должны оперативно обрабатывать входящий поток информации, отслеживать состояние безопасности целевой системы или сети и предупреждать о наличии потенциальных угроз. Как правило, к таким инструментам относят системы обнаружения и предупреждения вторжений, системы контроля доступа, сканеры уязвимостей, антивирусы и другие средства. Данные о состоянии безопасности могут быть собраны из разнородных источников и обработаны в едином интерфейсе SIEM-системы (Security Information and Event Management), что облегчает изучение характерных особенностей событий безопасности.

Под событием информационной безопасности понимается выявленное состояние системы или сети, указывающее на возможное нарушение политики или мер обеспечения ИБ, либо ранее неизвестная ситуация, которая может иметь отношение к вопросам безопасности. Событие, которое с высокой степенью вероятности может создать угрозы, называется инцидентом ИБ (ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2021). К подобного рода инцидентам можно отнести атаки и аномалии, характеризующиеся разной продолжительностью и определенными сценариями поведения [1]. Так, сценарий атаки может быть описан с помощью определения цели и источника атаки, а также промежуточных шагов атакующего, связанных между собой некоторыми логическими отношениями. С учетом данных факторов перспективным направлением обработки данных о состоянии безопасности является применение интеллектуальных методов корреляции событий ИБ.

В широком смысле под корреляцией понимается определение причинно-следственных взаимосвязей событий безопасности, что позволяет как идентифицировать текущее состояние безопасности, так и прогнозировать вероятностные состояния [2, 3]. Корреляция событий ИБ способствует лучшему пониманию развития атаки, определению источника и цели атаки, выявлению наиболее значимых событий. В задачах прогнозирования интеллектуальные методы корреляции событий безопасности способны анализировать как объемные исторические данные, так и события в реальном времени, а также автоматически обнаруживать изменяющиеся пороговые значения характеристик событий [4]. Это позволяет выявлять аномальные события и предотвращать кибератаки на ранних стадиях.

Постановка задачи. Цель настоящего исследования — повышение защищенности целевых систем и сетей за счет повышения уровня ситуационной осведомленности об ИБ путем разработки усовершенствованной модели корреляции событий безопасности. Входными данными модели корреляции событий безопасности являются данные о событиях безопасности в процессе функционирования системы, а также данные о возможных состояниях безопасности; выходные данные модели — 1) последовательность взаимосвязанных событий безопасности; 2) тип текущего состояния безопасности системы, 3) прогнозируемое состояние безопасности системы.

Поток регистрируемых событий безопасности обозначим как множество $E = \{e_n\}$, $n = 1, \dots, N$, где N — размер множества, а возможные классы (типы) состояний безопасности системы — как $Y = \{y_k\}$, $k = 0, \dots, K$, где K — количество классов. В качестве классов состояний безопасности системы могут применяться как бинарное множество $Y = \{\text{normal}, \text{anomaly}\}$, где normal — штатное состояние системы, anomaly — состояние системы, отличное от штатного (аномалия), так и множество $Y = \{ns_1, \dots, ns_d, as_1, \dots, as_k\}$, где $ns_1, \dots, ns_d$ — подмножество штатных состояний системы, $as_1, \dots, as_k$ — подмножество, состоящее из атак [5]. Таким образом, входные данные модели являются парой (E, Y) .

Последовательность взаимосвязанных событий безопасности $eS = (E, R)$, где E — вектор событий безопасности, а $R = \{R_h\}$, $h = 1, \dots, H$, — множество отношений между событиями безопасности, H — размер множества R . Каждый элемент множества R описывает некоторые условия отношения пары событий $e_i \in E$ и $e_j \in E$ как отображение $r: e_i \rightarrow e_j$, $r \in R$, где символ

„ $\rightarrow$ “ обозначает функциональную зависимость между событиями. Последовательность событий безопасности можно охарактеризовать классом текущего состояния системы y^E , где $y^E \in Y$, а также классом прогнозируемого состояния безопасности $\hat{y}^E \in Y$. Таким образом, получение выходных данных модели корреляции событий безопасности можно представить как отображение $M_\gamma: (E, Y) \rightarrow (eS, y^E, \hat{y}^E)$.

Комбинированная модель корреляции. В научной литературе представлено большое количество моделей корреляции событий безопасности. На основе проведенного аналитического обзора [6] можно выделить три основные категории методов корреляции событий безопасности:

- корреляция на основе сходства — определение взаимосвязей на основе подобия атрибутов или векторов событий;
- причинно-следственная корреляция — определение взаимосвязей пошаговым образом на основе предпосылок и последствий;
- корреляция на основе интеллектуального анализа данных — обнаружение существенных закономерностей и шаблонов в потоках событий на основе методов вычислительного интеллекта.

Также предложена классификация моделей представления знаний о событиях на основе классических методов: правила, логическое представление, семантические сети и фреймы [7, 8]. В качестве логического представления знаний о событиях безопасности определены семантические модели [9], а в качестве семантических сетей — графовые [10, 11]. Фреймы рассмотрены как набор функций и меток, используемых при машинном обучении. Таким образом, выделены следующие модели представления знаний о событиях: модели на основе правил, семантические модели, графовые модели и модели машинного обучения.

В данном исследовании представлена разработанная комбинированная модель корреляции событий безопасности:

$$M_\gamma = \langle (MR_\gamma, MX_\gamma), (MSB_\gamma, MGB_\gamma, MDM_\gamma) \rangle,$$

где (MR_γ, MX_γ) — уровень представления событий безопасности: MR_γ — модель представления событий безопасности на основе структурного анализа, MX_γ — модель представления событий безопасности на основе семантического анализа; $(MSB_\gamma, MGB_\gamma, MDM_\gamma)$ — уровень корреляции событий безопасности: MSB_γ — модель корреляции событий безопасности на основе сходства, MGB_γ — модель причинно-следственной корреляции событий безопасности на основе графо-ориентированного подхода, MDM_γ — модель корреляции на основе интеллектуального анализа данных.

Уровень представления событий безопасности. Под структурным анализом понимается определение вектора события безопасности в виде ряда признаков, характеризующих событие. Такой подход, как правило, применяется для построения моделей корреляции на основе правил, графов или моделей машинного обучения [12]. Под семантическим анализом понимается определение вектора события с использованием методов контекстно-ориентированного анализа естественного языка для построения семантических моделей корреляции событий [13].

Извлечение признаков событий безопасности путем структурного анализа предполагает выделение ряда значимых характеристик. Модель представления событий безопасности на основе структурного анализа можно описать как

$$MR_\gamma = (E, F^E, D, \phi^d),$$

где $F^E = \{f_k\}$ — множество признаков событий безопасности, $k = 1, \dots, K$, K — размер множества; $D = \{D_k\}$ — область допустимых значений признака, так что $D_k = \{d_{kl}\}$ — множество

допустимых значений признака f_k , $l = 1, \dots, L$, L — количество значений; $\varphi^d: E \rightarrow D_k$ — функция извлечения признаков событий безопасности.

Каждое событие безопасности $e \in E$ можно представить в виде вектора признаков $\mathbf{a}^e = \{(f_1, d_1), \dots, (f_k, d_k)\}$, где пара (f_i, d_i) соответствует i -му признаку события ($f_i \in F^E$) со значением $d_i \in D_k$. Результатом структурного анализа множества E является матрица векторов событий безопасности Φ размером $N \times K$ (N — количество событий в наборе) для описания состояния безопасности системы: $\Phi = (\mathbf{a}^{e_1}, \dots, \mathbf{a}^{e_n})^T = \|(f_{ij}, d_{ij})\|_{k \times n}$.

Для обработки семантического контекста событий безопасности, которые содержат данные в текстовом формате (лог-линии, полезная нагрузка и т.д.), предлагается использовать методы обработки естественного языка, такие как встраивания слов. Модель представления событий безопасности на основе семантического анализа можно описать как

$$MX_\gamma = (E, V^E, \varphi^V),$$

где V^E — векторное пространство событий; $\varphi^V: E \rightarrow V^E$ — функция преобразования события в вектор действительных чисел (эмбединг), который определяет координаты события в V^E .

Соответственно событие безопасности $e \in E$ можно представить в виде вектора $\mathbf{v}^e = \{v_q\}$, $v_q \in \mathbb{R}$, $q=1, \dots, Q$, где Q — длина вектора. Аналогично матрица Φ состоит из эмбедингов событий и имеет размер $N \times Q$: $\Phi = (\mathbf{v}^{e_1}, \dots, \mathbf{v}^{e_n})^T = \|v_{ij}\|_{q \times n}$.

Так, уровень представления событий безопасности позволяет получить матрицу векторов событий, которая является, в свою очередь, входными данными для уровня корреляции. Далее данная матрица обозначается как $\Phi = (\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n)^T$, где $\mathbf{e}_i = (x_{i1}, \dots, x_{iz})$ — вектор события безопасности $e_i \in E$ длиной z , x_{ij} — элемент i -го вектора. Матрица, в которой события безопасности упорядочены по времени появления, определяется как $\Phi(t) = ((\mathbf{e}_1, t_1), \dots, (\mathbf{e}_n, t_n))^T$, где t_i — временная метка события. Для обучающей матрицы событий Φ^y содержащиеся в ней события относятся некоторому классу $y \in Y$: $\Phi^y = ((\mathbf{e}_1, y_1), \dots, (\mathbf{e}_n, y_n))^T$.

Уровень корреляции событий безопасности. Предлагаемая модель корреляции позволяет как идентифицировать схожие события, так и обнаруживать между ними причинно-следственные связи. В основе корреляции событий безопасности на основе сходства лежит идея, что схожие состояния безопасности могут иметь одинаковый класс. Модель корреляции событий безопасности на основе сходства описывается как

$$MSB_\gamma = (\Phi, Y, c^f, s^e, \omega^k),$$

где $c^f: \Phi \rightarrow C$ — функция корреляции элементов векторов событий, C — матрица корреляции элементов векторов событий безопасности; $s^e: (\Phi, C) \rightarrow S$ — функция, определяющая подобие векторов событий, S — матрица сходства векторов событий безопасности; ω^k — алгоритм определения наиболее схожих событий.

Матрица корреляции C определяется как $C = \|c^f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)\|_{z \times z} = \|c_{ij}\|_{z \times z}$, где c_{ij} — коэффициент корреляции для событий x_i и x_j . Подобие векторов событий определяется путем вычисления „мягкой“ косинусной меры сходства s^e , которая характеризует угол между векторами, а также учитывает корреляцию между их элементами. В результате преобразования формируется матрица сходства векторов событий безопасности:

$$S = s^e(\Phi, C) = \|s^e(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j)\|_{n \times n},$$

$$s^e(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j) = \frac{\sum_{q=1, p=1}^z c_{qp} x_{iq} x_{jp}}{\sqrt{\sum_{q=1, p=1}^z c_{qp} x_{iq} x_{ip} \cdot \sum_{q=1, p=1}^z c_{qp} x_{jq} x_{jp}}}.$$

При заданном пороге сходства $s^{\min}$ схожие между собой события объединяются в кластеры $H^E = \{\mathbf{H}_i\}$, где $\mathbf{H}_i = \{\mathbf{e}_j \mid s^e(\mathbf{e}_j, \mathbf{e}_l) \geq s^{\min} \forall \mathbf{e}_l \in \mathbf{H}_i\}$. Для любой пары событий в матрице кластера их сходство выше указанного порогового значения. Для любого регистрируемого вектора события $\mathbf{e}_r$ полученные значения располагаются в порядке возрастания: $s^e(\mathbf{e}_{(1:r)}, \mathbf{e}_r) \leq s^e(\mathbf{e}_{(2:r)}, \mathbf{e}_r) \leq \dots \leq s^e(\mathbf{e}_{(n:r)}, \mathbf{e}_r)$, где через $\mathbf{e}_{(i:r)}$ обозначается событие, являющееся i -м соседним с $\mathbf{e}_r$. Алгоритм ω^k относит $\mathbf{e}_r$ к тому классу, представителей которого окажется больше всего среди k наиболее схожих с $\mathbf{e}_r$ событий:

$$\omega^k(\Phi^y, \mathbf{e}_r) = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^k [y(\mathbf{e}_{i:r}) = y] = y^{e_r}.$$

Корреляция событий на основе сходства не учитывает последовательность событий во времени в отличие от причинно-следственной корреляции. Модель причинно-следственной корреляции событий безопасности на основе графо-ориентированного подхода представляется в следующем виде:

$$\text{MGB}_Y = (\Phi(t), Y, g, \text{GNN}(H^U, W)),$$

где $\Phi(t)$ — матрица векторов событий безопасности с временными метками; $g: \Phi(t) \rightarrow \mathbf{G}$ — функция построения графа событий безопасности, $\mathbf{G}$ — граф событий безопасности; GNN — графовая нейронная сеть, заданная множеством слоев H^U , U — количество слоев сети, $W = \{\mathbf{W}_u\}$ — множество матриц весов.

Граф события безопасности определяется как

$$\mathbf{G} = (\Phi(t), \mathbf{R}^G, w_E, w_R),$$

$$\mathbf{R}^G = \|r(e_i, e_j)\|_{n \times n} = \|R_{ij}\|_{n \times n},$$

где $\mathbf{R}^G$ — множество переходов между событиями безопасности, отраженными в вершины графа (ребра графа), R_{ij} — переход между $\mathbf{e}_i$ и $\mathbf{e}_j$; $w_E: \Phi(t) \rightarrow \mathbb{R}$ — функция, отображающая вершины в их весовые коэффициенты; $w_R: \mathbf{R}^G \rightarrow \mathbb{R}$ — функция, отображающая ребра в их весовые коэффициенты.

Применение функции w_R позволяет получить матрицу смежности графа $\mathbf{A}^G$:

$$\mathbf{A}^G = w_R(\mathbf{R}^G) = \|a_{ij}\|_{n \times n},$$

где a_{ij} — вес ребра, соединяющего вершины $\mathbf{e}_i$ и $\mathbf{e}_j$.

Для анализа графа событий безопасности предлагается использовать графовую нейронную сеть GNN, каждый слой которой может быть представлен следующей нелинейной функцией:

$$H^{(u+1)} = \sigma(\mathbf{A}^G \times H^{(u)} \times \mathbf{W}^{(u)}),$$

где $\mathbf{W}^{(u)}$ — матрица весов для u -го слоя сети, σ — функция активации; на входном слое $H^{(0)} = \mathbf{G}$, а на выходном слое $H^{(U)} = y^G$, где y^G — класс графа событий.

Модель корреляции на основе интеллектуального анализа данных может быть представлена в следующем виде:

$$\text{MDM}_Y = \langle \Phi(t), Y, \mu^e, \text{BiLSTM}(\mathbf{x}_t, \mathbf{h}_t, \mathbf{y}_t, \mathbf{c}_t, \Omega, W, B, \Sigma) \rangle,$$

где $\mu^e: \Phi(t) \rightarrow \mathbf{x}_t$ — функция преобразования матрицы векторов событий во входной вектор сети; BiLSTM — двунаправленная нейронная сеть LSTM, имеющая в качестве параметров входной вектор $\mathbf{x}_t$, скрытый вектор $\mathbf{h}_t$, выходной вектор $\mathbf{y}_t$, вектор состояний $\mathbf{c}_t$, векторы

вентилей $\Omega = (\mathbf{f}_t, \mathbf{i}_t, \mathbf{o}_t)$, множество матриц весов $W = \{\mathbf{W}_{ij}\}$, множество векторов смещения $B = \{\mathbf{b}_j\}$ и множество функций активации $\Sigma = \{\sigma_j\}$.

Долгая краткосрочная память (Long Short-Term Memory — LSTM) является разновидностью рекуррентных нейронных сетей и позволяет эффективно анализировать данные в случае, когда важные события разделены временными лагами неопределенной продолжительности. LSTM-блоки содержат вентили $\mathbf{f}_t, \mathbf{i}_t, \mathbf{o}_t$, реализованные в виде логистических функций, для контроля потоков информации на входах и выходах данных блоков, а также вектор состояний $\mathbf{c}_t$ в качестве внутренней памяти, которая обновляется с использованием текущего и предыдущего состояний:

$$\text{LSTM} = \begin{cases} \mathbf{f}_t = \sigma_g(\mathbf{W}_{xf}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hf}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}_{cf}\mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_f); \\ \mathbf{i}_t = \sigma_g(\mathbf{W}_{xi}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hi}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}_{ci}\mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_i); \\ \mathbf{o}_t = \sigma_g(\mathbf{W}_{xo}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{ho}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}_{co}\mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_o); \\ \mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \circ \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \circ \sigma_c(\mathbf{W}_{xc}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hc}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_c); \\ \mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \circ \sigma_c(\mathbf{c}_t); \\ \mathbf{y}_t = \mathbf{h}_t, \end{cases}$$

где $\mathbf{f}_t$ — вектор вентилей забывания (вес запоминания старой информации); $\mathbf{i}_t$ — вектор входного вентилей (вес получения новой информации); $\mathbf{o}_t$ — вектор выходного вентилей (кандидат на выход); $\mathbf{W}_{jk}$ — матрица весов для преобразования вектора j в компоненту вектора k ; $\mathbf{b}_j$ — вектор смещения вектора j ; σ_g — функция активации на основе сигмоиды; σ_c — функция активации на основе гиперболического тангенса; знак „ $\circ$ “ — произведение Адамара (покомпонентное произведение двух матриц).

Для анализа причин и последствий событий безопасности целесообразно анализировать и последующую информацию. В этом случае предлагается использовать двунаправленную модель долгой краткосрочной памяти (bidirectional LSTM, BiLSTM), позволяющую определять последовательность событий безопасности в двух направлениях:

$$\text{BiLSTM} = \begin{cases} \mathbf{h}_t^{\rightarrow} = \text{LSTM}(\mathbf{x}_t, \mathbf{h}_{t-1}^{\rightarrow}); \\ \mathbf{h}_t^{\leftarrow} = \text{LSTM}(\mathbf{x}_t, \mathbf{h}_{t+1}^{\leftarrow}), \end{cases}$$

где $\mathbf{h}_t, \mathbf{h}_{t-1}$ и $\mathbf{h}_{t+1}$ — векторы текущего, предыдущего и последующего скрытых состояний соответственно; индекс „ $\rightarrow$ “ обозначает прямое распространение информации, индекс „ $\leftarrow$ “ — обратное.

Взаимосвязь входных и выходных данных в комбинированной модели корреляции представлена в таблице.

Входные данные	Модель	Выходные данные
<i>Уровень представления событий безопасности</i>		
E — множество событий безопасности, Y — множество классов состояний безопасности системы	MR_γ	Φ — матрица векторов событий безопасности; $\Phi(t)$ — матрица векторов событий безопасности с временными метками,
	MX_γ	Φ^v — обучающая матрица векторов событий безопасности с метками классов состояний
<i>Уровень корреляции событий безопасности</i>		
Φ, Φ^v	MSB_γ	H^E — множество кластеров схожих событий безопасности, y^e — класс события безопасности
$\Phi(t), Y$	MGB_γ	$eS = G$ — граф событий безопасности, y^G — класс графа событий безопасности
$\Phi(t), Y$	MDM_γ	$eS = \text{BiLSTM}$ — модель нейронной сети событий безопасности; y_t — текущий вектор классов состояний безопасности, y_{t+1} — прогнозируемый вектор событий безопасности

Пример практической реализации. На основе предложенной комбинированной модели был определен подход к прогнозированию событий безопасности и реализован программный прототип на языке Python. Входными данными являются параметры состояний безопасности, собранные за некоторое время, предшествующее прогнозированию, выходными данными — прогнозируемые параметры состояний. Для предсказания параметров событий в следующий момент времени необходимо проанализировать предшествующие события во временном окне размерностью N . Построение обучающей и тестовой выборок осуществляется таким образом, что обучающая выборка содержит временной ряд данных, предшествующий временному ряду в тестовой выборке. Метриками качества прогнозирования являются среднеквадратическая ошибка (MSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 ; \quad \text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|,$$

где Y и $\hat{Y}$ — ряд наблюдаемых и ряд прогнозируемых значений переменной соответственно, n — длина ряда.

В качестве экспериментального набора данных использованы журналы событий, регистрирующие параметры процесса вождения „умного крана“ для 8 ездовых циклов [14]. Каждый ездовой цикл состоит из повторения процессов подъема груза, движения из точки A в точку B по маршруту, опускания груза, подъема груза, возвращения в точку A и опускания груза. Признаковое пространство содержит 12 характеристик ездового процесса, а состояние безопасности обозначается бинарной меткой (норма/аномалия).

Ошибки прогнозирования рассчитываются между реальными и прогнозируемыми параметрами как для характеристик каждого процесса по отдельности, так и в целом для состояния безопасности системы. Результаты по среднеквадратической ошибке прогнозирования каждой характеристики представлены на рис. 1. Для MSE по индивидуальным признакам установлено пороговое значение в 0,05, а для MAE — в 0,22 ($\approx \sqrt{0,05}$). Можно отметить, что ошибки в прогнозировании 8 признаков ниже пороговых значений. Наименьшие ошибки прогнозирования достигаются для признака 4 — MSE=0,017 и MAE=0,094, признака 6 — MSE=0,013 и MAE=0,055 и признака 12 — MSE=0,014 и MAE=0,081.

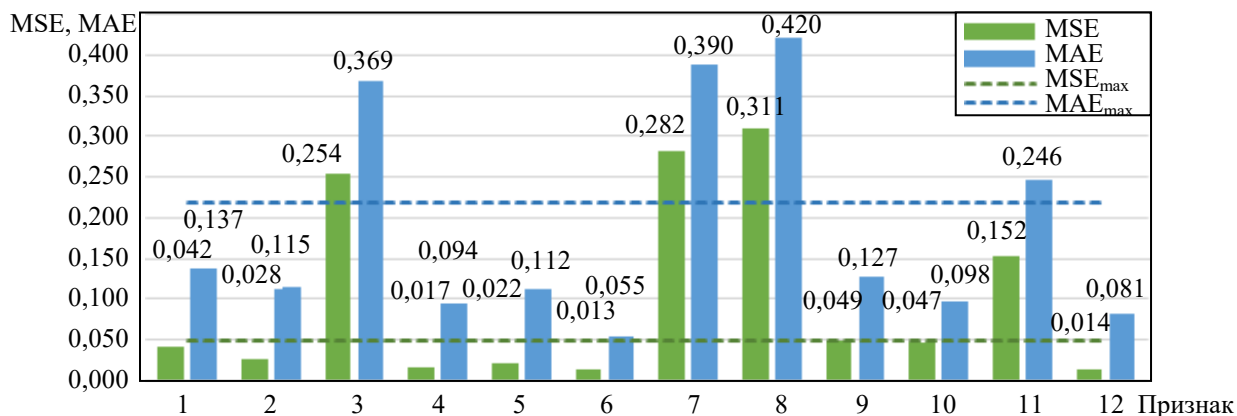


Рис. 1

На рис. 2 приведены ошибки прогнозирования состояния безопасности для каждого из 8 ездовых циклов (N — номер цикла). Для MSE установлен порог в 0,075 ($0,05 \cdot 12/8$), а для MAE — в 0,27 ($\approx \sqrt{0,075}$). Для четырех циклов значения MSE ниже пороговых, а для семи циклов значения MAE ниже пороговых. Таким образом, прогнозирование состояний безопасности достигается при низком уровне ошибок.

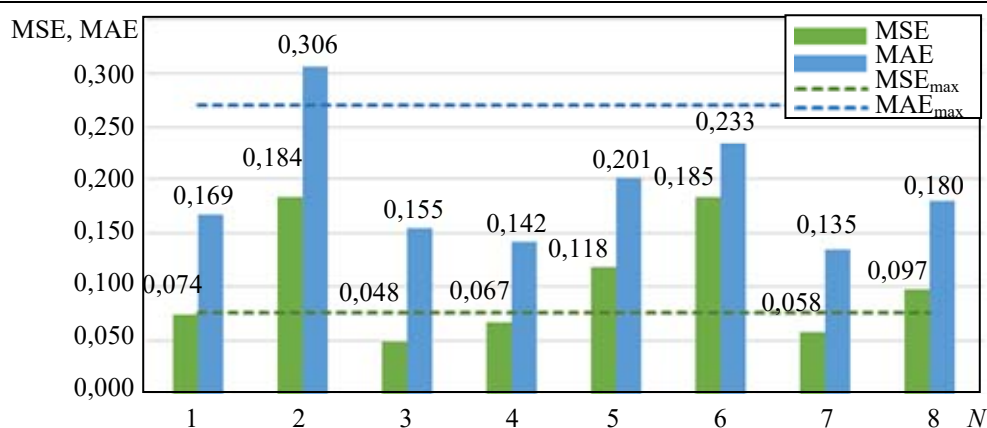


Рис. 2

Заключение. Предложено решение задачи корреляции событий безопасности с применением комбинированной модели корреляции, включающей в себя два уровня моделей с позиций а) представления знаний о событиях безопасности, б) методов корреляции событий безопасности. Представление знаний о событиях достигается путем объединения их структурного и семантического анализа. Уровень корреляции событий безопасности основан на применении методов корреляции, базирующихся на сходстве элементов векторов событий, нейросетевом графо-ориентированном подходе и анализе данных с помощью рекуррентных нейронных сетей. Эффективность предложенной комбинированной модели проиллюстрирована результатами эксперимента по прогнозированию событий безопасности системы на основе двунаправленной BiLSTM, входящей в состав модели корреляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котенко И. В., Саенко И. Б., Коцыняк М. А., Лаута О. С. Оценка киберустойчивости компьютерных сетей на основе моделирования кибератак методом преобразования стохастических сетей // Информатика и автоматизация. 2017. Т. 6, № 55. С. 160—184.
2. Albasheer H., Siraj Md M., Mubarakali A., Elsier Tayfour O., Salih S., Hamdan M., Kamarudeen S. Cyber-Attack Prediction Based on Network Intrusion Detection Systems for Alert Correlation Techniques: A Survey // Sensors. 2022. Vol. 22, N 4. P. 1494 (1—15).
3. Москвичев А. Д., Долгачев М. В. Алгоритмы корреляции событий информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2020. № 3. С. 50—59.
4. Гайфулина Д. А., Котенко И. В. Анализ моделей глубокого обучения для задач обнаружения сетевых аномалий интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 1 (110). С. 28—37.
5. Kovačević I., Groš S., Slovenec K. Systematic review and quantitative comparison of cyberattack scenario detection and projection // Electronics. 2020. Vol. 9, N 10. P. 1722 (1—32).
6. Kotenko I., Gaifulina D., Zelichenok I. Systematic Literature Review of Security Event Correlation Methods // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 43387—43420.
7. Охмилев М. Ю. Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизированных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов. СПб: СПбГУАП, 2018. 261 с.
8. Tanwar P., Prasad T. V., Aswal M. S. Comparative study of three declarative knowledge representation techniques // Intern. Journal on Computer Science and Engineering. 2010. Vol. 2, N 07. P. 2274—2281.
9. Sikos L. F. AI in digital forensics: Ontology engineering for cybercrime investigations // Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science. 2021. Vol. 3, N 3. P. e1394 (1—11).
10. Zeng J., Wu S., Chen Y., Zeng R., Wu C. Survey of attack graph analysis methods from the perspective of data and knowledge processing // Security and Communication Networks. 2019. Vol. 2019. P. 1—16.
11. Lallie H. S., Debattista K., Bal J. A review of attack graph and attack tree visual syntax in cyber security // Computer Science Review. 2020. Vol. 35. P. 100219 (1—41).

12. Маликов А. В., Авраменко В. С., Саенко И. Б. Модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном обучении // Информационно-управляющие системы. 2019. № 6 (103). С. 32—42.
13. Бутусов И. В., Романов А. А. Предупреждение инцидентов информационной безопасности в автоматизированных информационных системах // Вопр. кибербезопасности. 2020. № 5 (39). С. 45—51.
14. Ala-Laurinaho R., Keski-Heikkilä T. Driving smart crane with various loads // IEEE Dataport [Электронный ресурс]: <<https://iee-dataport.org/documents/driving-smart-crane-various-loads>>.

Сведения об авторе

Диана Альбертовна Левишун

— аспирант; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; мл. научный сотрудник;
E-mail: gaifulina@comsec.spb.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Kotenko I.V., Saenko I.B., Kotsynyak M.A., Lauta O.S. *Informatics and Automation*, 2017, no. 6(55), pp. 160–184. (in Russ.)
2. Albasheer H., Siraj Md M., Mubarakali A., Elsier Tayfour O., Salih S., Hamdan M., Kamarudeen S. *Sensors*, 2022, no. 4(22), pp. 1494(1–15).
3. Moskvichev A.D., Dolgachev M. V. *Automation of Control Processes*, 2020, no. 3, pp. 50–59. (in Russ.)
4. Gaifulina D.A., Kotenko I.V. *Information and Control Systems*, 2021, no. 1(110), pp. 28–37. (in Russ.)
5. Kovačević I., Groš S., Slovenec K. *Electronics*, 2020, no. 10(9), pp. 1722(1–32).
6. Kotenko I., Gaifulina D., Zelichenok I. *IEEE Access.*, 2022, vol. 10, pp. 43387–43420.
7. Okhtilev M.Yu. *Sistemy iskusstvennogo intellekta i ikh primeneniye v avtomatizirovannykh sistemakh monitoringa sostoyaniya slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh ob'yektov* (Artificial Intelligence Systems and Their Application in Automated Systems for Monitoring the State of Complex Organizational and Technical Objects), St. Petersburg, 2018, 261 p. (in Russ.)
8. Tanwar P., Prasad T.V., Aswal M.S. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2010, no. 07(2), pp. 2274–2281.
9. Sikos L.F. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 2021, no. 3(3), pp. e1394(1–11).
10. Zeng J., Wu S., Chen Y., Zeng R., Wu C. *Security and Communication Networks*, 2019, vol. 2019, pp. 1–16.
11. Lallie H.S., Debattista K., Bal J. *Computer Science Review*, 2020, vol. 35, pp. 100219(1–41).
12. Malikov A.V., Avramenko V.S., Saenko I.B. *Information and Control Systems*, 2019, no. 6(103), pp. 32–42. (in Russ.)
13. Butusov I., Romanov A. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2020, no. 5(39), pp. 45–51. (in Russ.)
14. Ala-Laurinaho R., Keski-Heikkilä T. *Driving smart crane with various loads*, <https://iee-dataport.org/documents/driving-smart-crane-various-loads>.

Data on author

Diana A. Levshun

— Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Computer Security Problems; Junior Researcher; E-mail: gaifulina@comsec.spb.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 28.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ
ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЧАСТИЧНО СКРЫТЫХ ЛИЦ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

М. А. ЛЕТЕНКОВ, Р. Н. ЯКОВЛЕВ*, М. В. МАРКИТАНТОВ,
Д. А. РЮМИН, А. А. КАРПОВ

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
*iakovlev.r@mail.ru,

Аннотация. Для решения проблемы автоматического распознавания лиц людей, использующих такие средства индивидуальной защиты, как медицинская маска, предложен и апробирован новый подход, основанный на применении методов генерации синтетических изображений частично скрытых лиц и модели распознавания лиц ArcFace. Предложена стратегия формирования обучающих наборов данных и получен ряд соответствующих моделей распознавания. Проведена серия экспериментов, направленных на оценку качества предсказаний полученного решения, и установлена зависимость между результирующим качеством предсказаний, реализуемых моделями распознавания, и объемом синтетических изображений в обучающих наборах данных. Согласно результатам экспериментальных исследований, нейросетевые модели, дообученные на наборах данных, в которых объем искусственно синтезированных изображений составляет 40—60 %, демонстрируют более высокие значения показателя точности распознавания, выше 87 % по количественной метрике ААс (Averaged Accuracy). Использование предложенного подхода позволяет значительно улучшить качество распознавания частично скрытых лиц по сравнению с базовым подходом.

Ключевые слова: распознавание лиц, нейросетевые модели распознавания, ArcFace, BRAVE-MASKS, генерация синтетических изображений, средства индивидуальной защиты, глубокое обучение

Благодарности: исследование выполнено за счет Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-04-60529-вирусы), а также частично в рамках ведущей научной школы (грант № НШ-17.2022.1.6)

Ссылка для цитирования: Летенков М. А., Яковлев Р. Н., Маркитантов М. В., Рюмин Д. А., Карпов А. А. Применение методов синтеза обучающих данных для распознавания частично скрытых лиц на изображениях // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 842—850. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-842-850.

**APPLICATION OF TRAINING DATA SYNTHESIS METHODS
FOR RECOGNITION OF PARTIALLY HIDDEN FACES IN IMAGES**

М. А. Letenkov, R. N. Iakovlev*, M. V. Markitantonov, D. A. Ryumin, A. A. Karpov

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
*iakovlev.r@mail.ru,

Abstract. A new approach to solving the problem of automatic face recognition of people using personal protective equipment such as a medical mask has been proposed and tested. This approach is based on the use of methods of generating synthetic images of partially hidden faces and the face recognition model ArcFace. A strategy for training data sets formation is proposed and a number of corresponding recognition models are derived. A series of experiments aimed at assessing the quality of predictions of the obtained solution are carried out, and a relationship between the resulting quality of predictions implemented by recognition models and the volume of synthetic images in training datasets is established. According to the results of experimental studies, neural network models, further trained on datasets with volume of artificially synthesized images of 40-60%, demonstrate values of recognition accuracy above 87% on the AAc quantitative metric (Average Accuracy). Using the proposed approach makes it possible to significantly improve the quality of recognition of partially hidden faces compared to the basic approach.

Keywords: face recognition, neural network recognition models, ArcFace, BRAVE-MASKS, synthetic image generation, personal protective equipment, deep learning

Acknowledgments: the research was carried out at the expense of the Russian Foundation for Basic Research (project N 20-04-60529-viruses), as well as partially within the framework of a leading scientific school (grant N NS-17.2022.1.6).

For citation: Letenkov M. A., Iakovlev R. N., Markitantov M. V., Ryumin D. A., Karpov A. A. Application of training data synthesis methods for recognition of partially hidden faces in images. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 842—850 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-842-850.

Введение. В настоящее время существует множество подходов к решению задач детектирования и распознавания лиц на видеопоследовательностях или отдельных изображениях [1—4]. Однако большинство таких методов не универсальны и имеют высокий процент погрешности в условиях частичной окклюзии объекта съемки [5, 6], в том числе в случаях, когда лицо человека, использующего средства индивидуальной защиты (СИЗ), в частности медицинскую маску, частично скрыто. Принимая во внимание высокий уровень распространения коронавирусной инфекции COVID-19, а также установленные требования, связанные с необходимостью ношения СИЗ [7], следует отметить критическую потребность в разработке специализированных систем биометрической идентификации, способных к распознаванию в условиях, когда лицо человека частично скрыто. Ключевым условием разработки соответствующих систем идентификации является подготовка специализированных обучающих наборов данных, включающих изображения лиц людей, использующих маски (Masked Human Faces — MHF) как средство индивидуальной защиты (далее — MHF-изображение) [8, 9]. Однако формирование масштабных наборов данных с высокой долей MHF-изображений в каждом конкретном случае представляет собой крайне трудоемкую и ресурсоемкую задачу [10—12].

Таким образом, настоящее исследование посвящено разработке подхода к распознаванию частично скрытых лиц, основанного на применении методов генерации синтетических (синтезированных) MHF-изображений при формировании обучающих наборов данных.

Современное состояние исследований. Известные к настоящему времени подходы к распознаванию лиц предусматривают возможность построения биометрических систем идентификации людей по изображениям. При проектировании таких систем наиболее релевантными являются методы, основанные на применении моделей глубокого обучения [3, 6]. Среди современных моделей глубокого обучения, нацеленных на решение задачи идентификации лиц, наибольший интерес представляют Facenet [3], Sphreface [13], Cosface [14], Arcface [4] (далее — ArcFace). Модель глубокого обучения Facenet [3], превзошедшая более распространенные сверточные нейросети и победившая на конкурсе ImageNet 2014, основана на архитектуре GoogleNet [15]. В качестве базовой модели в рамках данной архитектуры используется нейросетевая модель Inception-Resenet-v1. Функция потерь, используемая в рамках модели Facenet, определена поэлементной суммой значений функции потерь triplet loss и функции L2-регуляризации. При оценке качества предсказаний, реализуемых моделью распознавания на наборе данных MegaFace [16], было получено значение метрики Accuracy, равное 70,49 %.

В отличие от модели Facenet, использующей евклидово пространство для размещения признаков векторов с возможностью их классификации путем расчета евклидова расстояния между ними, модель Sphreface [13], представленная в 2017 г., является сверточной нейросетью, включающей 64 слоя, в архитектуре которой задействованы residual-блоки. В качестве функции потерь используется angular softmax (A-Softmax), что позволяет модели классифицировать признаки векторы путем анализа угловых расстояний между ними. Данный подход позволил превзойти результаты Facenet при оценке модели Sphreface на наборе данных MegaFace [16], где значение метрики Accuracy достигло 75,76 %.

Разработчики модели Cosface [14] предложили отойти от использования стандартных функций потерь, применяемых при решении задачи идентификации лиц. Был сформирован новый вид функции потерь, названный LMCL, получаемой посредством представления softmax loss как cosine loss путем применения L2-нормализации к признаковым и весовым векторам. Такой подход позволяет уменьшить значения радиальных отклонений на последнем этапе процесса идентификации, что положительно влияет на минимизацию внутрикласовых и максимизацию межклассовых расстояний. Cosface является результатом применения разработанной концепции функции потерь к 64-слойной сверточной нейросети Sphreface. Экспериментальные оценки, производимые на наборе данных MegaFace [16], показали достаточно высокий уровень предсказаний, реализуемых моделью Cosface: модели удалось достичь значения Ассигасу в 82,72 %.

В контексте крупномасштабного распознавания лиц следует выделить исследование [4], посвященное нейросетевой модели распознавания ArcFace. В работе авторы решают задачу оптимизации функции потерь. Для достижения большей разделимости классов в евклидовом пространстве предложена функция Additive Angular Margin Loss. В качестве базовой модели использовалась сверточная нейросеть Sphreface. Модель ArcFace по сравнению с моделями Sphreface и Cosface обладает постоянным линейным угловым запасом (constant linear angular margin), что позволяет существенно повысить разделимость классов в признаковом пространстве. При тестировании модели ArcFace на наборе данных MegaFace [16] удалось достичь значения метрики Ассигасу в 98,35 %, что является лучшим результатом среди обзримых моделей. Таким образом, исходя из особенностей рассмотренных моделей глубокого обучения при разработке подхода к распознаванию частично скрытых лиц наиболее предпочтительным представляется использование модели глубокого обучения ArcFace.

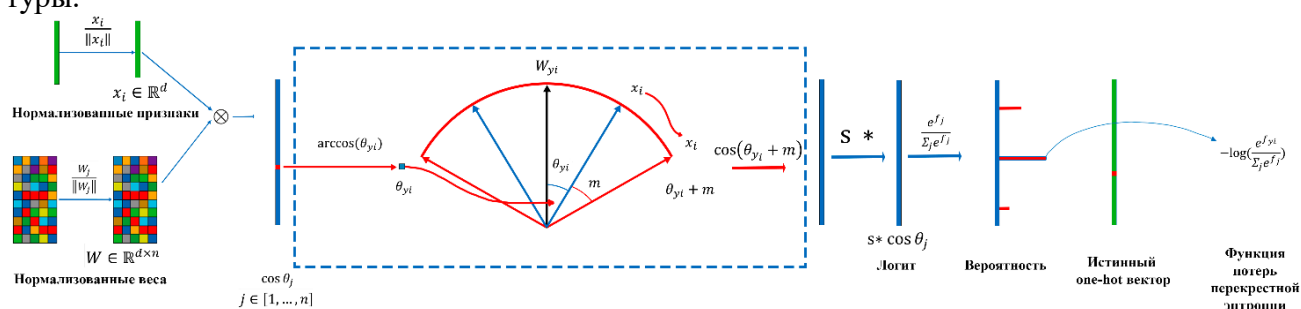
Для реализации предлагаемого подхода необходимо также определить наиболее релевантные методы генерации синтетических МНФ-изображений, которые могут быть использованы для формирования обучающих наборов данных и последующего тестирования полученного решения. В рамках предыдущего этапа работ коллективом авторов настоящей статьи проведен детальный анализ современного состояния исследований по данной проблематике и предложен собственный метод генерации синтетических изображений лиц людей в защитных масках, основанный на комбинированном использовании средств трехмерного моделирования объектов и нейросетевого метода детектирования трехмерных лицевых ориентиров на изображениях (3D-FAN) [17]. В рамках проведенного эксперимента разработанный метод продемонстрировал высокое и стабильное качество: доля корректно сгенерированных изображений лиц в масках по результатам применения разработанного метода к тестовому набору данных оказалась равной 95,9 %.

Таким образом, в рамках настоящего исследования в качестве метода генерации синтетических МНФ-изображений предлагается использовать авторский метод, представленный в работе [17].

Описание разработанного подхода. В соответствии с результатами проведенного анализа связанных методов и подходов для распознавания частично скрытых лиц в качестве исходной выбрана нейросетевая модель глубокого обучения ArcFace [4]. Обобщенный вид процедуры обучения нейросетевой архитектуры ArcFace представлен на рисунке [9]. На первом этапе на базе нормализованного набора признаков x_i и нормализованного набора весов W_j для каждого класса формируется функция $\cos\theta_j$ (Logit, логит) в виде $W_j^T x_i$. Далее вычисляются значения $\arccos\theta_{ji}$ и определяются углы между вектором признаков x_i и векторами истинных весов W_{ji} . Затем к целевым углам θ_{ji} добавляются компоненты углового смещения m , после чего определяются величины $\cos(\theta_{ji} + m)$, которые в дальнейшем проходят процедуру масштабирования по параметру s . Далее логиты передаются в функцию softmax, после чего полученные значения используются при расчете функции потерь перекрестной энтропии (cross-

entropy loss). Использование предложенного подхода приводит к тому, что связанные признаки распределяются по гиперсфере с радиусом s , а аддитивная составляющая углового смещения m при этом одновременно способствует снижению внутриклассовых и увеличению межклассовых расстояний.

Среди существующих реализаций архитектуры ArcFace наиболее популярной является имплементация, выполненная с использованием программных библиотек PyTorch и TensorFlow. В контексте настоящего исследования задействован открыто распространяемый программный пакет InsightFace [18], включающий предобученную реализацию данной архитектуры.



Одним из ключевых условий реализации предлагаемого подхода является отсутствие потребности в наличии обучающего набора данных, включающего МНФ-изображения. Таким образом, в рамках настоящего исследования была предложена следующая стратегия формирования обучающего набора данных: 1) разделение исходного набора данных на блоки A ($n, \%$) и B ($100 - n, \%$) от изначального размера набора данных (независимо по каждому классу); 2) формирование набора синтетических данных (B') за счет применения к блоку B метода генерации синтетических МНФ-изображений [17]; 3) формирование результирующего набора данных для обучения путем объединения блоков A и B' .

Предлагаемая стратегия формирования обучающего набора данных, необходимого для дообучения нейросетевой модели ArcFace, предполагает подготовку обучающего набора данных на основе некоторого исходного набора. Соответствующий исходный набор данных по умолчанию не включает в себя экземпляров данных, представляющих лица в масках, и должен обладать достаточной репрезентативностью и отсутствием зашумленных данных. Согласно предложенной стратегии, исходный набор данных разделяется на блоки A и B , разделение осуществляется независимо по каждому классу k ($k \in \{1 \dots K\}$), представленному в исходном наборе данных.

По результатам разделения блок B обрабатывается методом генерации синтетических МНФ-изображений, в результате формируется блок B' . Размер и структура данных в блоке B' определяются заданными параметрами метода генерации, такими как набор вариаций СИЗ, набор текстур СИЗ, фактор репликации. По умолчанию размер результирующего блока B' будет эквивалентен размеру исходного блока B .

На заключительном шаге осуществляется формирование результирующего набора данных для обучения путем объединения блоков A и B' . В случае единичного значения фактора репликации полученный набор данных будет обладать идентичной структурой распределения данных по классам по сравнению с исходным набором данных.

В рамках настоящего исследования принятая стратегия дообучения для модели ArcFace является достаточно распространенной и предполагает разбиение набора данных на обучающую и валидационную части. Дообучение происходит исключительно на обучающей части набора данных с применением стратегии кросс-валидации. Реализация модели, продемонстрировавшая по результатам применения кросс-валидации наиболее высокое качество идентификации, проходит финальную проверку на валидационной части набора данных.

Предложенная стратегия позволит минимизировать риски переобучения модели в процессе ее дообучения.

Далее перейдем к оценке реализации предложенного подхода.

Эксперименты. В качестве исходного набора данных для обучения использовалось подмножество корпуса аудиовизуальных русскоязычных данных (BRAVE-MASKS — Biometric Russian Audio-Visual Extended MASKS corpus) [19], включающее 26 информантов, использующих защитные маски, — BRAVE-MASKS-CL. Каждое из изображений, используемых при формировании BRAVE-MASKS-CL, содержит один объект (лицо), ориентированный под произвольными углами относительно осей координат OX , OY и OZ соответственно. Изображения, входящие в состав BRAVE-MASKS-CL, отображают лица без масок, отснятые в двух вариантах отдаления от фиксирующей камеры: ближнее и дальнее расположение. Общая характеристика исходного набора данных BRAVE-MASKS-CL представлена в табл. 1.

При апробации предложенного подхода в целях проведения сравнительного анализа полученных результатов была сформирована эталонная модель распознавания. В качестве набора данных для обучения эталонной модели также использовалось подмножество визуального корпуса BRAVE-MASKS, включающее те же 26 информантов — BRAVE-MASKS-M. Все экземпляры данных, входящие в состав набора, представляют собой MHF-изображения, прочие параметры BRAVE-MASKS-M в целом аналогичны BRAVE-MASKS-CL. Общая характеристика набора данных BRAVE-MASKS-M также приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	BRAVE-MASKS-CL	BRAVE-MASKS-M
Общее количество изображений, шт.	3900	3900
Разрешение изображений, пиксел	1920×1080	1920×1080
Количество информантов	26	26
Среднее количество изображений на информанта, шт.	150	150
Число представленных типов СИЗ, шт.	—	4

В рамках настоящего эксперимента было апробировано множество реализаций стратегии формирования обучающего набора данных с различными параметрами как разбиения исходного набора данных на блоки, так и метода генерации синтетических изображений. Апробированные реализации данной стратегии с указанием значений представленных выше параметров отражены в табл. 2. По результатам применения указанных ранее реализаций стратегии формирования обучающих наборов данных к исходному BRAVE-MASKS-CL получено 14 наборов данных разного объема, различающихся долей MHF-изображений, входящих в состав соответствующих наборов.

Таблица 2

Набор данных	n , %	Фактор репликации	Число вариаций СИЗ	Число вариаций текстур СИЗ
BRAVE-MASKS-CL-100	100	—	—	—
BRAVE-MASKS-CL-75/1	75	1	3	4
BRAVE-MASKS-CL-60/1	60	1		
BRAVE-MASKS-CL-60/2	60	2		
BRAVE-MASKS-CL-50/1	50	1		
BRAVE-MASKS-CL-50/2	50	2		
BRAVE-MASKS-CL-50/3	50	3		
BRAVE-MASKS-CL-40/1	40	1		
BRAVE-MASKS-CL-25/1	25	1		
BRAVE-MASKS-CL-25/2	25	2		
BRAVE-MASKS-CL-0/2	0	2		

В ходе экспериментов дообучение нейросетевой модели ArcFace проводилось на всех полученных наборах данных. Процесс дообучения осуществлялся независимо согласно описанной ранее стратегии дообучения с применением кросс-валидации, а также выделением

валидационной выборки. Число блоков кросс-валидации было задано равным 5, объем валидационной выборки составлял 20 %. Разбиение проводилось таким образом, чтобы все блоки содержали экземпляры данных каждого из классов с отсутствием множественных включений одних и тех же единиц данных в различные подмножества изображений. Аналогичная стратегия была использована и для дообучения эталонной модели идентификации, где в качестве обучающего набора данных выступал набор BRAVE-MASKS-M-80, сформированный путем исключения 80 % изображений по каждому классу из BRAVE-MASKS-M. Оставшаяся часть набора данных, обозначенная как BRAVE-MASKS-M-20, выполняла функцию контрольной выборки при определении результирующей оценки качества идентификации по MHF-изображениям.

По итогам выполнения предложенной стратегии дообучения на каждом из обучающих наборов данных, представленных в табл. 2, определена дообученная реализация модели Arc-Face, продемонстрировавшая наиболее высокое качество идентификации на соответствующих валидационных выборках, — модели (1)–(11). Значения метрики AAc (Averaged Accuracy), полученные данными моделями на валидационных выборках, отражены в табл. 3. На заключительном этапе эксперимента модели (1)–(11) были применены к набору данных BRAVE-MASKS-M-20 — в табл. 3 представлены полученные ими значения показателей AAc, AP (Averaged Precision) и AR (Averaged Recall), а также дополнительно приведены аналогичные показатели, полученные эталонной моделью идентификации.

Таблица 3

Модель	Обучающий набор данных	Валидационные выборки	Набор данных BRAVE-MASKS-M-20		
		AAc	AAc	AP	AR
(1)	BRAVE-MASKS-CL-100	0,989	0,795	0,796	0,773
(2)	BRAVE-MASKS-CL-75/1	0,993	0,835	0,847	0,764
(3)	BRAVE-MASKS-CL-60/1	0,987	0,855	0,869	0,767
(4)	BRAVE-MASKS-CL-60/2	0,992	0,872	0,893	0,793
(5)	BRAVE-MASKS-CL-50/1	0,995	0,868	0,863	0,789
(6)	BRAVE-MASKS-CL-50/2	0,986	0,874	0,899	0,775
(7)	BRAVE-MASKS-CL-50/3	0,984	0,881	0,909	0,798
(8)	BRAVE-MASKS-CL-40/1	0,996	0,875	0,899	0,781
(9)	BRAVE-MASKS-CL-25/1	0,996	0,853	0,868	0,757
(10)	BRAVE-MASKS-CL-25/2	0,991	0,833	0,847	0,762
(11)	BRAVE-MASKS-CL-0/2	0,99	0,813	0,827	0,750
Эталон	BRAVE-MASKS-M-80	0,983	0,957	0,974	0,892

На основе полученных результатов можно выявить определенную зависимость между долей синтетических MHF-изображений в обучающем наборе данных и результирующим качеством предсказаний, реализуемых полученной моделью распознавания лиц. Данная зависимость условно носит параболический характер: первоначально, по мере увеличения в составе обучающей выборки доли синтетических MHF-изображений (модели (1)–(7)), качество предсказаний достаточно устойчиво возрастает, при этом для моделей, обученных на выборках с более высоким фактором репликации, характерна более высокая точность распознавания. Однако при последующем увеличении доли синтетических MHF-изображений в составе обучающих выборок до 60 % и более (без учета фактора репликации) зависимость между качеством предсказаний и долей синтетических изображений становится обратной, более того, фактор репликации также начинает вносить отрицательный вклад в конечное качество предсказаний. Таким образом, по результатам эксперимента наилучшее качество распознавания было продемонстрировано моделями (4), (6), (7) и (8), в данном случае метрика AAc на наборе данных BRAVE-MASKS-M-20 достигла значений 0,872, 0,874, 0,881 и 0,875 соответственно.

Важно отметить, что результирующее качество распознавания для полученных моделей так и не достигло уровня эталонной модели, где метрика ААс на наборе данных BRAVE-MASKS-M-20 достигла значения 0,957. Тем не менее качество распознавания для модели (7), продемонстрировавшей в рамках эксперимента наиболее высокое качество предсказаний среди разработанных моделей, оказалось по показателю ААс на 8,6 % выше по сравнению с моделью (1), где в состав обучающей выборки не были включены синтетические МНФ-изображения.

Заключение. На основе авторского метода генерации синтетических изображений лиц людей в защитных масках и модели распознавания лиц ArcFace разработан и успешно апробирован подход к распознаванию лиц по изображениям в условиях, когда лицо человека частично скрыто. Предложенный подход продемонстрировал высокие показатели качества распознавания лиц (ААс=0,881). По сравнению с базовым подходом, где в состав обучающей выборки не были включены синтетические МНФ-изображения, прирост точности распознавания по показателю ААс составил 8,6 %, а по AP — 11,3 %. Полученные результаты свидетельствуют о практической значимости предложенного подхода и позволяют сделать вывод о целесообразности дообучения нейросетевых моделей распознавания лиц с использованием смешанных наборов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang K., Zhang Z., Li Z., Qiao Y. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks // IEEE Signal Processing Letters. 2016. Vol. 23, N 10. P. 1499—1503. DOI: 10.1109/LSP.2016.2603342.
2. Zhang F., Fan X., Ai G., Song J., Qin Y., Wu J. Accurate face detection for high performance // arXiv preprint arXiv:1905.01585. 2019. P. 1—9.
3. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. P. 815—823. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298682.
4. Deng J., Guo J., Xue N., Zafeiriou S. Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition // Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 4690—4699.
5. He Y., Xu D., Wu L., Jian M., Xiang S., Pan C. LFFD: A light and fast face detector for edge devices // arXiv preprint arXiv:1904.10633. 2019. P. 1—10. DOI: 10.48550/arXiv.1904.10633.
6. Parkhi O. M., Vedaldi A., Zisserman A. Deep face recognition // British Machine Vision Conf.: Proc. 2015. P. 1—12. DOI: 10.5244/C.29.41.
7. Rab S., Javaid M., Haleem A., Vaishya R. Face masks are new normal after COVID-19 pandemic // Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews. 2020. Vol. 14, N 6. P. 1617—1619.
8. Martínez-Díaz Y., Méndez-Vázquez H., Luevano L. S., Nicolás-Díaz M., Chang L., González-Mendoza M. Towards Accurate and Lightweight Masked Face Recognition: an Experimental Evaluation // IEEE Access. 2021. Vol. 10. P. 7341—7353.
9. Anwar A., Raychowdhury A. Masked face recognition for secure authentication // arXiv preprint arXiv:2008.11104. 2020. P. 1—8.
10. Cao Q., Shen L., Xie W., Parkhi O. M., Zisserman A. Vggface2: A dataset for recognising faces across pose and age // 13th IEEE Intern. Conf. on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018). 2018. P. 67—74.
11. Guo Y., Zhang L., Hu Y., He X., Gao J. Ms-celeb-1m: A dataset and benchmark for large-scale face recognition // European Conf. on Computer Vision. Cham: Springer, 2016. P. 87—102.
12. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Liang J. Masked face recognition dataset and application // arXiv preprint arXiv:2003.09093. 2020. P. 1—3.
13. Liu W., Wen Y., Yu Z., Li M., Raj B., Song L. Sphreface: Deep hypersphere embedding for face recognition // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 212—220.

14. Wang H., Wang Y., Zhou Z., Ji X., Gong D., Zhou J., Liu W. Cosface: Large margin cosine loss for deep face recognition // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 5265—5274.
15. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Rabinovich A. Going deeper with convolutions // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. P. 1—9.
16. Kemelmacher-Shlizerman I. et al. The megaface benchmark: 1 million faces for recognition at scale // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 4873—4882.
17. Letenkov M. A., Iakovlev R. N., Markitantov M. V., Ryumin D. A., Saveliev A. I., Karpov A. A. Method for Generating Synthetic Images of Masked Human Faces // Scientific Visualization. 2022. Vol. 14, N 2. P. 1—17. DOI: 10.26583/sv.14.2.01.
18. InsightFace: 2D and 3D Face Analysis Project [Электронный ресурс]: <<https://github.com/deepinsight/insightface>> 08.07.2022.
19. Markitantov M., Ryumina E., Ryumin D., Karpov A. Biometric Russian Audio-Visual Extended MASKS (BRAVE-MASKS) Corpus: Multimodal Mask Type Recognition Task // Proc. of ISCA Intern. Conf. INTERSPEECH-2022. Korea. 2022.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Максим Андреевич Летенков | — СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория технологий больших данных социокиберфизических систем; мл. научный сотрудник;
E-mail: letenkovmaksim@yandex.ru |
| Роман Никитич Яковлев | — СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория технологий больших данных социокиберфизических систем; мл. научный сотрудник;
E-mail: iakovlev.r@mail.ru |
| Максим Викторович Маркитантов | — СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; мл. научный сотрудник;
E-mail: m.markitantov@yandex.ru |
| Дмитрий Александрович Рюмин | — канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; ст. научный сотрудник;
E-mail: ryumin.d@iiias.spb.su |
| Алексей Анатольевич Карпов | — д-р техн. наук, доцент; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; гл. научный сотрудник;
E-mail: karpov@iiias.spb.su |

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Zhang K., Zhang Z., Li Z., Qiao Y. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, no. 10(23), pp. 1499—1503, DOI: 10.1109/LSP.2016.2603342.
2. Zhang F., Fan X., Ai G., Song J., Qin Y., Wu J. *arXiv preprint arXiv:1905.01585*, 2019, pp. 1—9.
3. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 815—823, DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298682.
4. Deng J., Guo J., Xue N., Zafeiriou S. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 4690—4699.
5. He Y., Xu D., Wu L., Jian M., Xiang S., Pan C. *arXiv preprint arXiv:1904.10633*, 2019, pp. 1—10, DOI: 10.48550/arXiv.1904.10633.
6. Parkhi O. M., Vedaldi A., Zisserman A. *Deep face recognition*, 2015, pp. 1—12. DOI: 10.5244/C.29.41.
7. Rab S., Javaid M., Haleem A., Vaishya R. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 2020, no. 6(14), pp. 1617—1619.
8. Martínez-Díaz Y., Méndez-Vázquez H., Luevano L. S., Nicolás-Díaz M., Chang L., González-Mendoza M. *IEEE Access.*, 2021, vol. 10, pp. 7341—7353.
9. Anwar A., Raychowdhury A. *arXiv preprint arXiv:2008.11104*, 2020, pp. 1—8.
10. Cao Q., Shen L., Xie W., Parkhi O.M., Zisserman A. *13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018)*, IEEE, 2018, pp. 67—74.
11. Guo Y., Zhang L., Hu Y., He X., Gao J. *European conference on computer vision*, Springer, Cham, 2016, pp. 87—102.
12. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Liang J. *arXiv preprint arXiv:2003.09093*, 2020, pp. 1—3.
13. Liu W., Wen Y., Yu Z., Li M., Raj B., Song L. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 212—220.
14. Wang H., Wang Y., Zhou Z., Ji X., Gong D., Zhou J., Liu W. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 5265—5274.

15. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Rabinovich A. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1–9.
16. Kemelmacher-Shlizerman I. et al. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 4873–4882.
17. Letenkov M.A., Iakovlev R.N., Markitantonov M.V., Ryumin D.A., Saveliev A.I., Karpov A.A. *Scientific Visualization*, 2022, no. 2(14), pp. 1–17, DOI: 10.26583/sv.14.2.01.
18. *InsightFace: 2D and 3D Face Analysis Project*, <https://github.com/deepinsight/insightface>.
19. Markitantonov M., Ryumina E., Ryumin D., Karpov A. *Proceedings of ISCA International Conference INTERSPEECH-2022*, Korea, 2022.

Data on authors

Maxim A. Letenkov	—	St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems; Junior Researcher; E-mail: letenkovmaksim@yandex.ru
Roman N. Iakovlev	—	St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems; Junior Researcher; E-mail: iakovlev.r@mail.ru
Maxim V. Markitantonov	—	St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Speech and Multimodal Interfaces Laboratory; Junior Researcher; E-mail: m.markitantonov@yandex.ru
Dmitry A. Ryumin	—	PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Speech and Multimodal Interfaces Laboratory; Senior Researcher; E-mail: ryumin.d@ias.spb.su
Alexey A. Karpov	—	Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Speech and Multimodal Interfaces Laboratory; Chief Researcher; E-mail: karpov@ias.spb.su

Received 18.07.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.