

# Программные продукты и системы

DOI 10.15827/0236-235X

/ О проблеме  
специализации  
в обучающихся  
системах управления

/ Модифицированный  
алгоритм построения  
карты занятости

/ Методы интеграции  
для разработки  
информационно-  
аналитических  
систем

/ Об обучении  
многослойного  
персептрона



№  
**2**  
ТОМ 33  
2020



Уважаемые коллеги!

Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН совместно с академическими институтами, библиотеками, музеями, архивами и издательствами проводит Всероссийскую научную конференцию **«Единое цифровое пространство научных знаний: проблемы и решения»** (г. Москва, 10–12 ноября 2020 г.).

Конференция посвящена вопросам формирования принципиально новой компьютерной среды, объединяющей разнородные (документальные и фактографические) ресурсы различных областей науки.

Цель конференции – выявление, систематизация и определение подходов к решению организационных, технологических, лингвистических, правовых проблем создания единого цифрового пространства научных знаний.

Планируется проведение пленарного заседания и заседаний по секциям: интеграция ресурсов институтов памяти (библиотек, музеев, архивов); правовые аспекты интеграции информационных ресурсов и технологии их формирования; общесистемные вопросы проектирования и лингвистические проблемы формирования единого цифрового пространства, его программное и технологическое обеспечение.

К участию в конференции приглашаются специалисты в области создания, поддержки и предоставления научных цифровых ресурсов.

С подробной информацией можно ознакомиться на сайте <http://dirsmc.ru/konf>.

### **НИИ «Центрпрограммсистем» на форуме «АРМИЯ-2020»**

Новейшие разработки НИИ «Центрпрограммсистем» в областях интеллектуализации, автоматизации систем управления, тренажерных систем, имитации и моделирования технических средств и защиты информации будут представлены на VI Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2020» (23–29 августа 2020 г., КВЦ «Патриот», г. Кубинка, Московская область).

Приглашаются партнеры и заказчики (павильон А, стенд 1F4-5) для обсуждения в располагающей обстановке перспектив сотрудничества.

Подробная информация размещена на сайте [www.cps.tver.ru](http://www.cps.tver.ru).

---

Научно-исследовательский институт  
«Центрпрограммсистем»

---

# Программные продукты и системы

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2020, том 33, № 2  
(год издания тридцать третий)

**Главный редактор**  
**Г.И. САВИН**, академик РАН

Тверь

## SOFTWARE & SYSTEMS

International research and practice journal

2020, vol. 33, no. 2

**Editor-in-Chief**  
**G.I. SAVIN**, Academician of the Russian Academy of Sciences

Tver  
Russian Federation

---

Research Institute CENTERPROGRAMSYSTEM

---

**Главный редактор**

**Г.И. САВИН,**

академик РАН (г. Москва, Россия)

Регистрационное свидетельство: ПИ № ФС 77-77843

**Научные редакторы:**

**В.В. Голенков,** д.т.н., профессор БГУИР  
(г. Минск, Беларусь)

Подписной индекс в каталоге  
Агентства «Роспечать» **70799**

**А.Б. Баламетов,** д.т.н., профессор АзНИПИИЭ  
(г. Баку, Азербайджан)

**ISSN 0236-235X** (печатн.)

**ISSN 2311-2735** (онлайн)

**МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Семенов Н.А.** – д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета,  
заместитель главного редактора (г. Тверь, Россия)

**Решетников В.Н.** – д.ф.-м.н., профессор Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета), заместитель главного редактора (г. Москва, Россия)

**Афанасьев А.П.** – д.ф.-м.н., профессор Московского физико-технического института (технического университета),  
заведующий Центром распределенных вычислений Института проблем передачи информации РАН (г. Москва, Россия)

**Баламетов А.Б.** – д.т.н., профессор Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-исследовательского института  
энергетики (г. Баку, Азербайджан)

**Батыршин И.З.** – д.т.н., профессор Мексиканского института нефти (г. Мехико, Мексика)

**Голенков В.В.** – д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)

**Еремеев А.П.** – д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва, Россия)

**Кузнецов О.П.** – д.т.н., профессор Института проблем управления РАН (г. Москва, Россия)

**Курейчик В.М.** – д.т.н., профессор Инженерно-технологической академии Южного федерального университета  
(г. Таганрог, Россия)

**Лисецкий Ю.М.** – д.т.н., генеральный директор «S&T Ukraine» (г. Киев, Украина)

**Мамросенко К.А.** – к.т.н., доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета),  
руководитель Центра визуализации и спутниковых информационных технологий НИИСИ РАН (г. Москва, Россия)

**Мейер Б.** – доктор наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей политехнической школы – ЕТН (г. Цюрих, Швейцария)

**Нууен Тхань Нзи** – д.ф.-м.н., профессор, проректор Ханойского открытого университета (г. Ханой, Вьетнам)

**Николов Р.В.** – доктор наук, профессор Университета библиотекведения и информационных технологий Софии  
(г. София, Болгария)

**Осипов Г.С.** – д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора Института системного анализа РАН (г. Москва, Россия)

**Палюх Б.В.** – д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета (г. Тверь, Россия)

**Рахманов А.А.** – д.т.н., профессор, заместитель генерального директора Концерна «РТИ Системы» (г. Москва, Россия)

**Серов В.С.** – д.ф.-м.н., профессор Университета прикладных наук Оулу (г. Оулу, Финляндия)

**Сотников А.Н.** – д.ф.-м.н., профессор, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН (г. Москва, Россия)

**Сулейманов Д.Ш.** – академик АН Республики Татарстан, д.т.н., профессор Казанского государственного технического  
университета (г. Казань, Республика Татарстан, Россия)

**Тарасов В.Б.** – к.т.н., доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана  
(г. Москва, Россия)

**Татарникова Т.М.** – д.т.н., доцент, профессор, директор Института информационных систем и геотехнологий  
Российского государственного гидрометеорологического университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

**Хорошевский В.Ф.** – д.т.н., профессор Московского физико-технического института (технического университета)  
(г. Москва, Россия)

**Язенин А.В.** – д.ф.-м.н., профессор Тверского государственного университета (г. Тверь, Россия)

**АССОЦИИРОВАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИИ**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия*

*Технологический институт Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия*

*Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия*

*Научно-исследовательский институт «Центрпрограммсистем», г. Тверь, Россия*

**АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ**

Россия, 170024, г. Тверь, пр. 50 лет Октября, 3а

Телефон (482-2) 39-91-49

Факс (482-2) 39-91-00

E-mail: red@cps.tver.ru

Сайт: www.swsys.ru

Дата выхода в свет 16.06.2020 г.

Отпечатано ООО ИПП «Фактор и К»

Россия, 170028, г. Тверь, ул. Лукина, д. 4, стр. 1

Выпускается один раз в квартал

Год издания тридцать третий. Формат 60×84 1/8. Объем 188 стр.

Заказ № 29. Тираж 1000 экз. Цена 330,00 руб.

Автор статьи отвечает за подбор, оригинальность и точность приводимого фактического материала.  
Авторские гонорары не выплачиваются. При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.



© SOFTWARE & SYSTEMS  
International research and practice journal

2020, vol. 33, no. 2  
DOI: 10.15827/0236-235X.130

**Editor-in-chief**

**G.I. Savin**, Academician of RAS  
(Moscow, Russian Federation)

**Science editors:**

**V.V. Golenkov**, Dr.Sc. (Engineering), Professor BSUIR  
(Minsk, Republic of Belarus)

**A.B. Balametov**, Dr.Sc. (Engineering), Professor AzSR&DPPEI  
(Baku, Azerbaijan)

**Publisher Research Institute  
CENTERPROGRAMSYSTEM  
(Tver, Russian Federation)**

Founder: V.P. Kupriyanov  
The journal is registered with the Federal Service  
for Supervision of Communications,  
Information Technology  
and Mass Communications (Roskomnadzor)  
March 3<sup>rd</sup>, 2020

Registration certificate: ПИ № ФС 77-77843  
**ISSN 0236-235X** (print)  
**ISSN 2311-2735** (online)

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

**Semenov N.A.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Tver State Technical University, Deputy Editor-in-Chief  
(Tver, Russian Federation)

**Reshetnikov V.N.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Moscow Aviation Institute  
(National Research University), Deputy Editor-in-Chief (Moscow, Russian Federation)

**Afanasiev A.P.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Moscow Institute of Physics and Technology,  
Head of the Centre for Distributed Computing of the Institute for Information Transmission Problems  
(Moscow, Russian Federation)

**Balametov A.B.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Azerbaijan Scientific-Research & Design-Prospecting Power  
Engineering Institute (Baku, Azerbaijan)

**Batyrshin I.Z.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Mexican Petroleum Institute (Mexico City, Mexico)

**Golenkov V.V.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
(Minsk, Republic of Belarus)

**Eremeev A.P.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the National Research University “Moscow Power Engineering  
Institute” (Moscow, Russian Federation)

**Kuznetsov O.P.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Institute of Control Sciences of the Russian Academy  
of Sciences (Moscow, Russian Federation)

**Kureichik V.M.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Academy of Engineering and Technology of the Southern  
Federal University (Taganrog, Russian Federation)

**Lisetsky Yu.M.** – Dr.Sc. (Engineering), CEO of S&T Ukraine (Kiev, Ukraine)

**Mamrosenko K.A.** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Moscow Aviation Institute (National Research  
University), Head of the Center of Visualization and Satellite Information Technologies SRISA RAS  
(Moscow, Russian Federation)

**Meyer B.** – Dr.Sc., Professor, Head of the Department in the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, ETH  
(Zurich, Switzerland)

**Nguyen Thanh Nghi** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Principal of the Hanoi Open University  
(Hanoi, Vietnam)

**Nikolov R.V.** – Full Professor of the University of Library Studies and Information Technology (Sofia, Bulgaria)

**Osipov G.S.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Deputy Principal of the Institute of Systems Analysis  
of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

**Palyukh B.V.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Tver State Technical University (Tver, Russian Federation)

**Rakhmanov A.A.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor, Deputy CEO of the Concern RTI Systems  
(Moscow, Russian Federation)

**Serov V.S.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Oulu University of Applied Sciences (Oulu, Finland)

**Sotnikov A.N.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy  
of Sciences (Moscow, Russian Federation)

**Suleimanov D.Sh.** – Academician of TAS, Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Kazan State Technical University  
(Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation)

**Tarassov V.B.** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Bauman Moscow State Technical University  
(Moscow, Russian Federation)

**Tatarnikova T.M.** – Dr.Sc. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Information Systems  
and Geotechnologies of the Russian State Hydrometeorological University (St. Petersburg, Russian Federation)

**Khoroshevsky V.F.** – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Moscow Institute of Physics and Technology  
(Moscow, Russian Federation)

**Yazenin A.V.** – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Tver State University (Tver, Russian Federation)

**ASSOCIATED EDITORIAL BOARD MEMBERS**

**National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation**

**Technology Institute at Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation**

**Tver State Technical University, Tver, Russian Federation**

**Research Institute CENTERPROGRAMSYSTEM, Tver, Russian Federation**

**EDITORIAL BOARD AND PUBLISHER OFFICE ADDRESS**

50 let Oktyabrya Ave. 3a, Tver, 170024, Russian Federation

Phone: (482-2) 39-91-49 Fax: (482-2) 39-91-00

E-mail: red@cps.tver.ru

Website: www.swsys.ru

Release date 16.06.2020

Printed in printing-office “Faktor i K”

Lukina St. 4/1, Tver, 170028, Russian Federation

Published quarterly. 33th year of publication

Format 60×84 1/8. Circulation 1000 copies

Prod. order № 29. Wordage 188 pages. Price 330,00 rub.

## **Вниманию авторов**

Международный журнал «Программные продукты и системы» публикует материалы научного и научно-практического характера по новым информационным технологиям, результаты академических и отраслевых исследований в области использования средств вычислительной техники. Практикуются выпуски тематических номеров по искусственному интеллекту, системам автоматизированного проектирования, по технологиям разработки программных средств и системам защиты, а также специализированные выпуски, посвященные научным исследованиям и разработкам отдельных вузов, НИИ, научных организаций.

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Министерства образования и науки РФ международный журнал «Программные продукты и системы» внесен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Информация об опубликованных статьях по установленной форме регулярно предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в CrossRef и в другие базы и электронные библиотеки.

## **Условия публикации**

К рассмотрению принимаются оригинальные материалы, отвечающие редакционным требованиям и соответствующие тематике журнала (специализация – информатика, вычислительная техника и управление, отрасли науки – 05.13.01; .06; .11; .12; .15; .17; .18).

Работа представляется в электронном виде в формате Word. При обилии сложных формул обязательно наличие статьи и в формате PDF. Формулы должны быть набраны в редакторе формул Word (Microsoft Equation или MathType). Объем статьи вместе с иллюстрациями – не менее 10 000 знаков. Диаграммы, схемы, графики должны быть доступными для редактирования (Word, Visio, Excel). Все иллюстрации для полиграфического воспроизведения представляются в черно-белом варианте. Цветные, тонированные, отсканированные, не подлежащие редактированию средствами Word рисунки и экранные формы следует присылать в хорошем качестве для их дополнительного размещения на сайте журнала в макете статьи с доступом по ссылке. Заголовок должен быть информативным; сокращения, а также терминологию узкой тематики желательно в нем не использовать. Количество авторов на одну статью – не более 4, количество статей одного автора в номере, включая соавторство, – не более 2. Список литературы, наличие которого обязательно, должен включать не менее 10 пунктов.

Необходимы также содержательная структурированная аннотация (не менее 250 слов), ключевые слова (7–10) и индекс УДК. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык (машинный перевод недопустим), а фамилии авторов, названия и юридические адреса организаций (если нет официального перевода) – транслитерированы по стандарту BGN/PCGN.

Вместе со статьей следует прислать экспертное заключение, лицензионное соглашение, а также сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, название и юридический адрес организации, структурное подразделение, должность, ученые степень и звание (если есть), контактный телефон, электронный адрес, почтовый адрес для отправки бесплатного авторского экземпляра журнала.

## **Порядок рецензирования**

Все статьи, поступающие в редакцию (соответствующие тематике и оформленные согласно требованиям к публикации), подлежат обязательному рецензированию в течение месяца с момента поступления.

В редакции есть устоявшийся коллектив рецензентов, среди которых члены международной редколлегии журнала, эксперты из числа крупных специалистов в области информатики и вычислительной техники ведущих вузов страны, а также ученые и специалисты НИИ «Центрпрограммсистем» (г. Тверь).

Рецензирование проводится конфиденциально. Автору статьи предоставляется возможность ознакомиться с текстом рецензии. При необходимости статья отправляется на доработку.

Рецензии обсуждаются на заседаниях рабочей группы, состоящей из членов научного совета журнала. Заседания проводятся раз в месяц в НИИ «Центрпрограммсистем» (г. Тверь), где принимается решение о целесообразности публикации статьи.

Статьи, одобренные редакционным советом, публикуются бесплатно в течение года с момента одобрения, а отправленные на доработку – с момента поступления после устранения замечаний.

Редакция международного журнала «Программные продукты и системы» в своей работе руководствуется сводом правил Кодекса этики научных публикаций, разработанным и утвержденным Комитетом по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE).

УДК 004.4:371  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185

Дата подачи статьи: 10.02.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 177–185

## **Программный комплекс управления подготовкой IT-специалистов SkillsForYou**

*В.В. Борисов*<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, *vbor67@mail.ru*

*С.П. Янукович*<sup>2</sup>, руководитель проекта, *syanukovich@mail.ru*

*Т.В. Мрочек*<sup>3</sup>, к.т.н., доцент *trowlad@mail.ru*

*Д.С. Ореховский*<sup>4</sup>, инженер-программист, *denis.orehovsky@gmail.com*

<sup>1</sup> Смоленский филиал Национального исследовательского университета МЭИ, г. Смоленск, 214013, Россия

<sup>2</sup> Могилевское агентство регионального развития, г. Могилев, 212014, Беларусь

<sup>3</sup> Белорусско-Российский университет, г. Могилев, 212022, Беларусь

<sup>4</sup> ООО iTechArt Group, г. Могилев, 212030, Беларусь

В настоящее время предлагаемые на рынке образовательных услуг варианты подготовки IT-специалистов в подавляющем большинстве не учитывают личностные особенности обучающихся, а также потребности рынка в кадрах. Для решения этих задач авторами разработан на Python программный комплекс SkillsForYou, имеющий модульную структуру, что позволяет реализовать поддержку подготовки IT-специалистов на основе цикла автоматизированного управления подготовкой. Цикл построен на основе теории управления организационными системами и состоит из этапов планирования, организации, стимулирования, контроля. Комплекс SkillsForYou содержит большое количество учебных курсов разной сложности по различным языкам и технологиям программирования (Java, C#, Python, JavaScript, HTML, CSS, PHP).

В SkillsForYou входит модуль анализа личностных и психологических качеств обучающихся, содержащий множество различных психологических тестов для оценки уровня сформированности качеств, необходимых IT-специалистам, и формирования команд специалистов для совместной работы в проектах. В математическом модуле по итогам психологического тестирования и результатам вычислений с применением алгоритмов роевого интеллекта определяются рекомендации по организации процесса обучения для каждого обучающегося. В работе алгоритмов роевого интеллекта используется статистика по сложности выбираемых для решения задач.

Для учебных курсов задачи подбираются в соответствии с таксономией целей обучения Блума, а для оценки сложности решаемых задач преподаватель курса назначает задачам стоимость. С целью упрощения поиска претендентов HR-специалистами и работодателями в программном комплексе ведется история прохождения учебных курсов и рейтинг обучающихся.

**Ключевые слова:** подготовка IT-специалистов, учет личностных и психологических качеств, алгоритмы роевого интеллекта.

Бурное развитие IT-отрасли обострило проблему нехватки высококвалифицированных IT-специалистов. Образование по соответствующему IT-профилю в настоящее время можно получить в высших и средних специальных учебных заведениях, IT-школах, на курсах IT-компаний, на онлайн-курсах и тренингах в сети Интернет. Однако выбор направления обучения осуществляется обычно интуитивно (исходя из собственного, часто небольшого жизненного опыта), на основе отзывов тех, кто уже прошел обучение, или консультаций с педагогами, и это часто приводит к неверному выбору будущей профессии. Кроме того, учебный процесс в учебных заведениях зачастую построен без учета постоянных изменений потребностей

рынка в кадрах. IT-компании и отделы промышленных предприятий, занимающиеся разработкой ПО, при поиске кадров зачастую не имеют возможности ознакомления с динамикой накопления знаний и умений соискателей, что затрудняет отбор кадров.

Таким образом, актуальной является организация учебного процесса по обучению IT-специалистов, направленного на решение следующих задач:

- определение направления подготовки с учетом личностно-психологических качеств обучающихся, профессиональных стандартов и квалификационных требований;
- обеспечение возможности предварительного ознакомления с содержанием учеб-

ных курсов и технологий, которые предстоит изучить, оценки уровня готовности к прохождению курса, определения, насколько это интересно и полезно;

- формирование рекомендаций по обучению на основе современных достижений в области педагогики, теории управления организационными системами, математического описания коллективного поведения самоорганизующихся систем (с использованием алгоритмов роевого интеллекта);
- обеспечение возможности обучения по удобным для обучающихся и преподавателей расписанию и темпу обучения, что проще всего реализовать в веб-приложении;
- формирование рейтинга обучающихся в процессе обучения, ведение учета динамики накопления знаний и умений;
- обеспечение возможности быстрого реагирования на изменяющиеся потребности работодателей за счет упрощения размещения и обновления новых учебных курсов и материалов.

Теоретическое обоснование организации процесса обучения на основе учета личностно-психологических качеств обучающихся и анализа результатов обучения (с использованием алгоритмов роевого интеллекта), полученное авторами, положено в основу разработанного программного комплекса SkillsForYou.

### Структура программного комплекса управления подготовкой IT-специалистов

Теоретической основой программного комплекса является цикл автоматизированного управления подготовкой IT-специалистов [1], разработанный на основе классической теории управления организационными системами с учетом особенностей учебного процесса в IT-сфере [2, 3]. Цикл состоит из четырех этапов – планирование, организация, стимулирование и контроль.

Разработанный программный комплекс имеет модульную структуру (рис. 1).

Модуль информационного управления подготовкой IT-специалистов позволяет организовать обучение будущих IT-специалистов различным востребованным языкам и технологиям программирования.

Модуль анализа личностных и психологических качеств обучающихся дает возможность реализовать современный подход к организации обучения с учетом личностных качеств обучающихся. Поскольку подавляющее большинство проектов в IT-сфере являются результатом работы команд специалистов с различными профессиональными навыками, при формировании команд очень важно учитывать личностные и психологические качества каждого из ее участников. Данный модуль с ис-



Рис. 1. Структура программного комплекса SkillsForYou

Fig. 1. The software complex structure SkillsForYou

пользованием встроенных психологических тестов позволяет отбирать и классифицировать обучаемых путем оценки их концентрации внимания, скорости реакции, памяти, коммуникативности, стрессоустойчивости и адаптивности. На основе результатов тестирования можно формировать команды, оценивать уровень сформированности качеств, необходимых IT-специалистам в соответствии с профессиональными стандартами и квалификационными требованиями (<http://fgosvo.ru/docs/69/0/2/6>, <https://standartgost.ru/g/pkey-14293830563>). Используются следующие психодиагностические методики: тест структуры интеллекта (TSI) Р. Амтхауэра [4], *дифференциально-диагностический опросник* (ДДО) для отбора на профессиональные направления в соответствии с классификацией типов профессий Е.А. Климова [4], оценка профессиональных предпочтений Дж. Холланда [4], методика Мюнстерберга [5] для определения избирательности и концентрации внимания, многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» [6] для оценки стрессоустойчивости и адаптивности личности, многофакторный личностный опросник Р. Кэттелла [7], тест вербальной креативности С. Медника (RAT) [8], диагностика волевого потенциала личности и диагностика личностной креативности (Е.Е. Туник) [9], диагностика коммуникативных и организаторских склонностей (КОС-2), определение индекса групповой сплоченности Сишора [9] и другие тесты [10]. Имеется возможность внести в данный модуль новые психологические тесты.

Математический модуль алгоритмов роевого интеллекта содержит алгоритмы роевания пчел, колонии муравьев, косяков рыб и светлячков [11, 12], адаптированные к специфике подготовки IT-специалистов [13]. В каждом учебном курсе с использованием таксономии целей обучения Блума [14] определена стоимость учебных задач с учетом их сложности. В зависимости от того, какие учебные задачи выбирает обучающийся для решения, в программном комплексе с применением соответствующего алгоритма роевого интеллекта для каждого конкретного обучающегося определяются рекомендации по дальнейшему обучению.

Взаимосвязь четырех основных этапов цикла автоматизированного управления подготовкой IT-специалистов с модулями программного комплекса показана на рисунке 2. Преподаватель имеет доступ ко всем элементам

цикла, обучающийся проходит учебный процесс, организованный именно для него на основе элементов стимулирования (рекомендации по переходам между уроками и курсами, рейтинг, сертификат).

### Модуль информационного управления подготовкой IT-специалистов

Данный модуль представляет собой веб-приложение, написанное на языке программирования Python, и содержит два основных модуля.

- Модуль организации материалов для подготовки IT-специалистов, предоставляющий возможность создания учебных курсов и предназначенный для преподавателей, руководителей учебных проектов, администраторов учебных курсов. Создаваемые учебные курсы имеют поурочную систему (количество и взаимосвязь уроков в курсе определяет преподаватель), при этом каждый урок может содержать теоретическую часть (краткие теоретические сведения, ссылки на обучающие интернет-ресурсы) и практическую (задачи различной сложности, проверочные тесты, промежуточные и итоговые контрольные работы).

- Модуль организации обучения IT-специалистов, предназначенный для обучающихся и позволяющий изучать методические материалы, тестировать правильность решения задач в рамках учебных курсов и на контрольных работах, обрабатывать результаты теоретических тестов.

Структура программного модуля информационного управления подготовкой IT-специалистов состоит из трех частей:

- клиентское приложение, обеспечивающее пользовательский интерфейс и написанное на Javascript-фреймворке Vue.js, позволяющем создавать SPA (Single Page Applications);

- серверная часть, хранящая бизнес-логику модуля и данные, получаемые из клиентского приложения (клиентская и серверная части взаимодействуют посредством API-интерфейса, предоставляемого сервером и разработанного на веб-фреймворках Django и Django Rest Framework, для реализации чата имеется возможность установления долговременного соединения с сервером путем подключения к конечной точке WebSocket);

- песочница для ввода кода обучающимся при решении задач, представляющая собой средство безопасного исполнения непротестированного кода в отдельном Docker-контей-

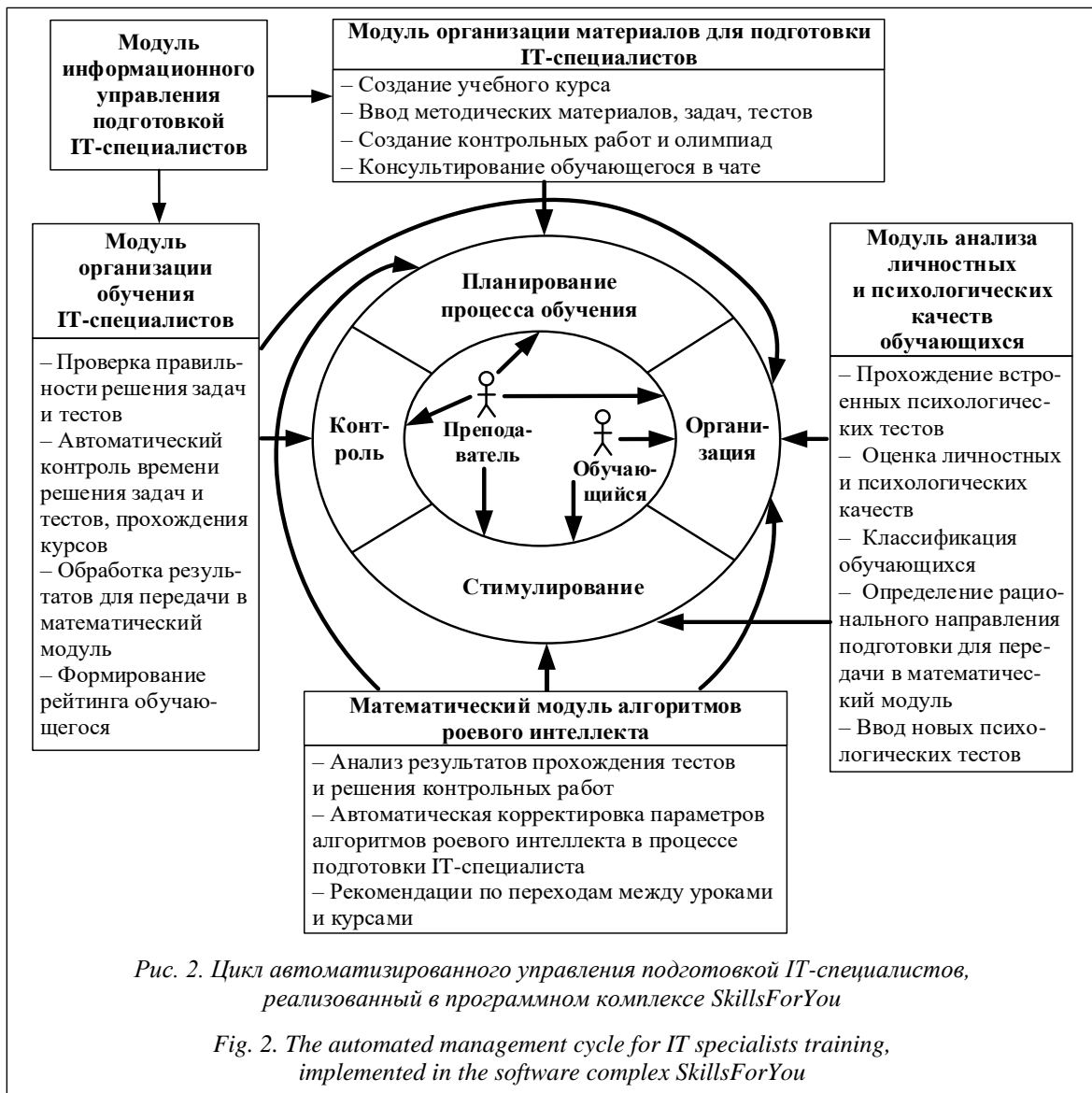


Рис. 2. Цикл автоматизированного управления подготовкой ИТ-специалистов, реализованный в программном комплексе SkillsForYou

Fig. 2. The automated management cycle for IT specialists training, implemented in the software complex SkillsForYou

нере и позволяющая через API-интерфейс, написанный на веб-фреймворке Express.js, запустить и получить результат выполнения кода.

В настоящее время в веб-приложении зарегистрированы следующие курсы (начинающий, средний, продвинутой уровни сложности):

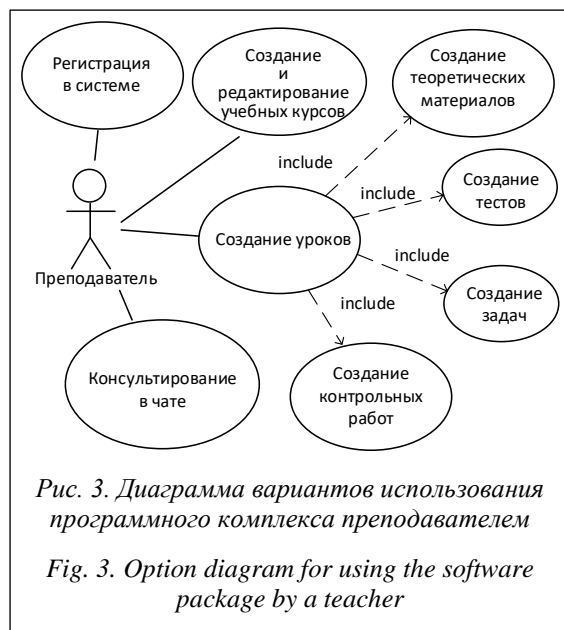
- по языкам программирования («Основы Java», «Java. Основы ООП», «Java. Введение в технологии», «Основы JavaScript», «Основы C#», «C# и платформа .NET», «Основы программирования на Python»);
- по веб-разработке («Основы HTML», «Основы CSS», «ASP.NET MVC», «Основы Django»);
- по мобильной разработке («Мобильные приложения на C#», «Мобильная верстка сайта

на HTML/CSS», «Разработка Android приложений на Java»).

### Модуль организации материалов для подготовки ИТ-специалистов

В данном модуле реализованы функции программного комплекса [1], представленные на рисунке 3.

Незарегистрированные пользователи при запуске веб-приложения могут увидеть названия курсов, общую статистику по обучающимся на этих курсах, предварительную информацию о преподавателях (имя и фото). После регистрации появляется возможность выбрать курс обучения. Во время регистрации пользователь заполняет анкету, содержащую информацию, необходимую для анализа стати-



стических данных по обучающимся в системе. После заполнения анкеты пользователю на e-mail высылаются логин и пароль. Для получения статуса преподавателя необходимо получить подтверждение от администратора системы.

Вариант использования «Создание и редактирование учебных курсов» реализован следующим образом: у каждого преподавателя есть личный кабинет с возможностью изменения пароля и персональных данных, а также учительский кабинет с возможностью создания нового учебного курса, доработки имеющегося курса и отслеживания прохождения созданных курсов обучающимися. По каждому курсу ведется статистика его прохождения обучающимися, что позволит определять востребованность и сложность прохождения, а также необходимость совершенствования курса. Для консультирования обучающихся имеется чат.

Реализация варианта использования «Создание уроков» предоставляет возможность создания преподавателем поурочной системы курса. При создании элементов урока определяются заголовок и описание, доля прохождения (преподаватель может задать минимум, при достижении которого урок будет считаться пройденным). После сохранения характеристик урока можно определить элементы «Шаг», из которых состоит урок: «Задача», «Ссылка» (открывается новое окно с внешним ресурсом), «Файл» (прикрепляется материал для скачивания), «Презентация» (вводятся текст и изображения, которые можно просмотреть в окне урока), «Тест» (вводятся вопросы и

варианты ответов с указанием верного; можно создавать тесты с однозначным и многозначным выбором; вопросы и ответы можно определять в виде графических объектов и др.). Элементы (шаги) урока можно при необходимости менять местами.

Для отработки практических навыков программирования преподаватель имеет возможность в рамках урока создать набор задач, каждая из которых имеет условие, авторское решение и проверочные тесты (как правило, не менее 10 тестов). В соответствии с таксономией целей обучения Блума [14] размещаются задачи, направленные на формирование у обучающегося знания, понимания, применения, анализа, синтеза и оценки значения изученных учебных материалов. Преподаватель может определить допустимое количество попыток (не менее 2) на решение задач и пороговое значение прохождения тестов, а также отметить обязательные тесты и процент пройденных тестов от общего количества, необходимый для того, чтобы задача была зачтена.

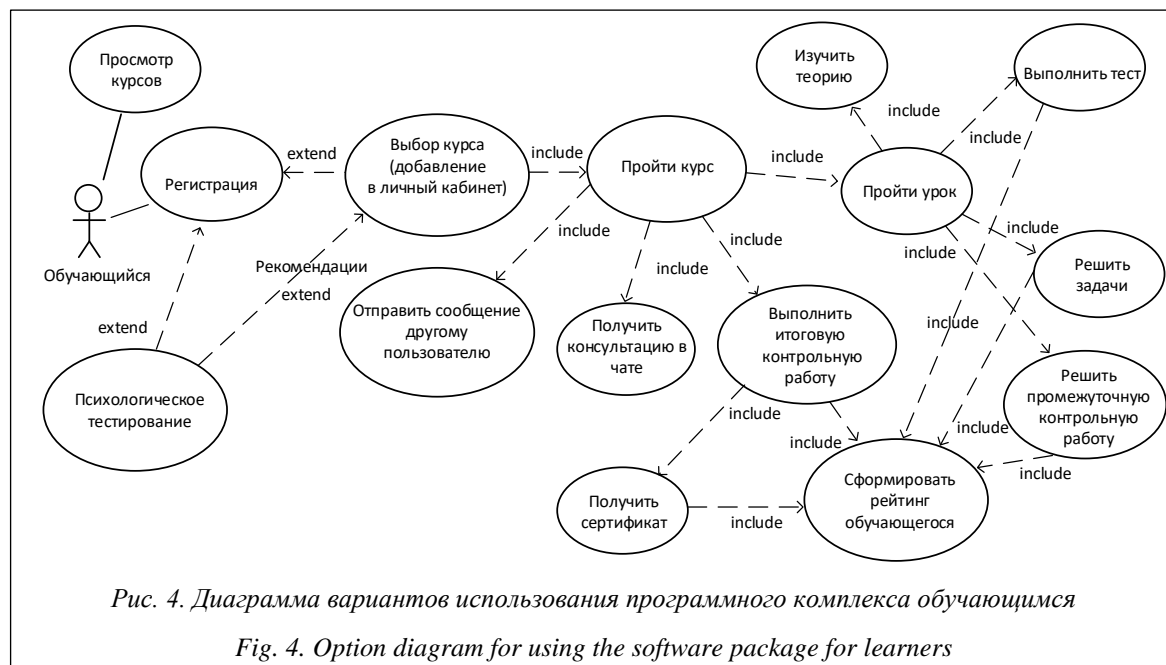
Проверка решения задачи после его отправки на сервер ведется автоматизированно. При определении баллов за решение в рейтинге ведется учет числа попыток отправки решения и времени решения каждой задачи. Решение задачи считается ошибочным, если оно не компилируется или не проходит проверочные тесты. Если было использовано допустимое число попыток, но задача не была решена, такая задача не засчитывается и обучающийся может посмотреть авторское решение. Если хотя бы часть проверочных тестов была пройдена, попытка не считается неудачной.

При создании контрольных работ преподаватель может создавать новые задачи или использовать задачи из уроков учебного курса, определять наборы задач на каждый уровень, количество попыток на решение задачи, указывать обязательные задачи и порог решения контрольной работы, устанавливать ограничение по времени выполнения всех задач или каждой задачи в отдельности.

### Модуль организации обучения ИТ-специалистов

В данном модуле реализованы функции программного комплекса [1], представленные на рисунке 4.

Обучающемуся выводится перечень курсов, имеющихся в системе. Можно осуществить фильтрацию списка курсов по дате добавления,



по алфавиту, по уровню сложности, по категориям.

Личный кабинет предназначен для смены пароля, просмотра и редактирования личных данных.

На странице выбранного курса обучающийся может видеть основные темы уроков. Каждый последующий урок становится доступным только после успешного завершения предыдущего. Если пользователь желает начать обучение с более сложного уровня, пропустив предыдущий, ему будет предложено решить контрольную работу предыдущего уровня. Успешное решение контрольной работы позволяет начать обучение на выбранном уровне. Теоретический материал из пройденных курсов остается доступным для рассмотрения обучающемуся на протяжении всего обучения, за исключением момента решения контрольной работы.

Обучающийся перемещается по элементам урока, в соответствии с полученными рекомендациями по дальнейшему обучению изучает теоретические материалы, пользуется предложенными ссылками, проходит теоретические тесты и решает задачи. В процессе решения задачи обучающийся имеет возможность смены компилятора в окне ввода решения.

Контрольная работа, в том числе и промежуточная, может иметь ограничение по времени выполнения. Обучающемуся предоставляются три попытки на решение итоговой контрольной с интервалом между контрольными не более недели. Если все предоставленные по-

пытки оказываются неудачными, курс нужно будет проходить заново.

При успешном выполнении итоговой контрольной работы обучающемуся выводится электронный сертификат о прохождении курса. Если обучающийся принимает результат, то данные фиксируются в личном кабинете, в противном случае курс считается незавершенным. Контрольную работу можно выполнять до трех раз, в кабинете зафиксирован результат, который примет пользователь, или последний, если все попытки были исчерпаны.

Если пользователь в течение шести месяцев не проходил обучение по выбранному курсу, то его прогресс обучения на курсе обнуляется. Все завершенные курсы остаются в памяти системы.

Для обеспечения стимулирования учащихся в программном комплексе на основании времени решения тестов, задач и контрольных работ, количества удачных и неудачных попыток, времени прохождения отдельных элементов уроков, тестов и курсов в целом формируется рейтинг обучающихся. Рейтинг может быть доступен для просмотра всем участникам процесса обучения, а также потенциальным работодателям.

### Заключение

Программный комплекс управления подготовкой IT-специалистов SkillsForYou позволяет усовершенствовать подготовку IT-специа-



листов за счет системного, научно обоснованного подхода к организации учебного процесса. Отличительными особенностями подхода к обучению, реализованного в разработанном программном комплексе, являются:

– реализация в различных модулях программного комплекса всех этапов (планирования, организации, стимулирования и контроля) цикла автоматизированного управления подготовкой IT-специалистов, построенного на основе классической теории управления организационными системами;

– учет личностных и психологических качеств обучающихся, что позволяет, принимая во внимание специфику подготовки IT-специалистов, вырабатывать рекомендации по дальнейшему обучению, формировать команды (например, для участия в различных обучающих проектах), определять направления совершенствования личностных и психологических качеств IT-специалистов, определенных профессиональными стандартами и квалификационными требованиями;

– определение рекомендаций по обучению, по переходам между курсами и уроками на основе результатов психологического тестирования и результатов работы алгоритмов роевого интеллекта с учетом накапливаемой статистики по сложности выбираемых задач; учебные задачи подбираются в соответствии с таксономией целей обучения Блума, и сложность учебных задач учитывается в их стоимости, назначаемой преподавателем курса;

– ведение рейтинга обучающихся, доступного для просмотра всем участникам учебного процесса, а также HR-специалистам и потенциальным работодателям;

– наличие множества курсов по различным языкам и технологиям программирования начинающего, среднего и продвинутого уровней сложности.

Кроме того, имеется возможность смены компилятора в окне ввода кода при решении задач, что позволяет совершенствовать знание теории и навыки написания кода на различных языках программирования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-03088\_мк.*

### *Литература*

1. Янукович С.П., Мрочек Т.В., Ореховский Д.С. Цикл автоматизированного информационного управления подготовкой IT-специалистов // Энергетика, информатика, инновации: сб. тр. VIII Междунар. науч.-технич. конф. Смоленск, 2018. Т. 3. С. 53–57.
2. Новиков Д.А. Структура теории управления социально-экономическими системами // Управление большими системами. 2009. № 24. С. 216–237.
3. Новиков Д.А. Теория управления образовательными системами. М.: Народное образование, 2009. 416 с.
4. Елисеев О.П. Практикум по психологии личности. СПб: Питер, 2010. 512 с.
5. Бруннер Е.Ю. Лучше, чем супервнимание: Методики диагностики и психокоррекции. Ростов-на-Дону, 2006. 316 с.
6. Куприянов Р.В., Кузьмина Ю.М. Психодиагностика стресса: практикум. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 212 с.
7. Батаршев А.В. Темперамент и характер: Психологическая диагностика. М., 2001. 336 с.
8. Барканова О.В. Методика диагностики одаренности и креативности: психологический практикум. Красноярск, 2011. 196 с.
9. Фетискин Н.П., Козлов В.В., Мануйлов Г.М. Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп. М., 2002. 339 с.
10. Прядеин В.П. Психодиагностика личности: избранные психологические методики и тесты. Сургут: Изд-во СурГПУ, 2014. 245 с.
11. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 446 с.
12. Матренин П.В. Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами. Новосибирск, 2018. 197 с.
13. Янукович С.П. Метод управления процессом обучения информационным технологиям на основе алгоритмов роевого интеллекта // Информатика и образование. 2019. № 7. С. 32–41. DOI: 10.32517/0234-0453-2019-34-7-32-41.

14. Бактыбаев Ж.Ш. Использование технологии таксономии Блума в учебном процессе вуза // Ярославский пед. вестн. 2017. № 1. С. 150–153. URL: [http://vestnik.yspu.org/releases/2017\\_1/31.pdf](http://vestnik.yspu.org/releases/2017_1/31.pdf) (дата обращения: 15.01.2020).

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185

Received 10.02.20  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 177–185

### Software complex SkillsForYou for the IT specialists training management

V.V. Borisov<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, vbor67@mail.ru  
S.P. Yanukovich<sup>2</sup>, Project Manager, syanukovich@mail.ru  
T.V. Mrochek<sup>3</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, mrovlad@mail.ru  
D.S. Orekhovsky<sup>4</sup>, Software Engineer, denis.orehovsky@gmail.com

<sup>1</sup> Smolensk Branch of the Moscow Power Engineering Institute (National Research University), Smolensk, 214013, Russian Federation

<sup>2</sup> Mogilev Regional Development Agency, Mogilev, 212014, Republic of Belarus

<sup>3</sup> Belarusian-Russian University, Mogilev, 212000, Republic of Belarus

<sup>4</sup> ITechArt Group, Mogilev, 212030, Republic of Belarus

**Abstract.** Currently, there are options for training IT specialists in the educational services market. They overwhelmingly do not take into account the student's personal characteristics, as well as the market needs in labors. To solve these problems, the authors have developed software complex SkillsForYou (in the Python programming language), which has a modular structure that allows implementing support for the IT specialists training based on the cycle of automated management of training IT specialists (based on the theory of organizational systems management and consisting of stages of planning, organization, stimulation, control).

The SkillsForYou contains a large number of training courses of different complexity in various languages and programming technologies (Java, C#, Python, JavaScript, HTML, CSS, PHP).

The complex includes a module for analyzing the personal and psychological learner's qualities, which contains many different psychological tests to assess the quality formation-level necessary for IT specialists, and the specialist team formation to collaborate on projects. The mathematical module on the psychological testing results and the results of calculations using swarm intelligence algorithms determine recommendations for organizing the learning process for each learner. Swarm intelligence algorithms use statistics on the complexity of the problems selected for solving.

Problems for training courses are in accordance with the taxonomy of Bloom's training goals, and to assess the problem complexity to solve, the course teacher assigns a cost to the problems.

In order to facilitate the search for applicants by HR specialists and employers the software complex stores the education history in the learning courses and the learners' rating.

**Keywords:** IT specialists' training, accounting for personal and psychological qualities, swarm intelligence algorithms.

**Acknowledgements.** This work was with financial support by RFBR, project no. 18-29-03088\_МК.

### References

1. Janukovich S.P., Mrochek T.V., Orekhovsky D.S. A cycle of automated information management of training IT-specialists. *Proc. 8th Intern. Conf. Energy, Computer Science, Innovation*. Smolensk, 2018, vol. 3, pp. 53–57 (in Russ.).
2. Novikov D.A. The structure of the theory of managing socio-economic systems. *Large System Management*, 2009, no. 24, pp. 216–237 (in Russ.).
3. Novikov D.A. *The Theory of Educational System Management*. Moscow, 2009, 416 p. (in Russ.).
4. Eliseev O.P. *Personality Psychology Tutorial*. St. Petersburg, 2010, 512 p. (in Russ.).

5. Brunner E.Yu. *Better than Superattention: Diagnosis and Psychotherapy Techniques*. Rostov-on-Don, 2006, 316 p. (in Russ.).
6. Kupriyanov R.V., Kuzmina Yu.M. *Stress Psychodiagnostics: Practical Course*. Kazan, KSTU Publ., 2012, 212 p. (in Russ.).
7. Batarshhev A.V. *Temperament and Temper: A Psychological Diagnostics*. Moscow, 2001, 336 p. (in Russ.).
8. Barkanova O.V. *Methods of Diagnosing Giftedness and Creativity: A Psychological Workshop*. Krasnoyarsk, 2011, 196 p. (in Russ.).
9. Fetiskin N.P., Kozlov V.V., Manuilov G.M. *Social and Psychological Diagnostics of Personality Development and Small Groups*. Moscow, 2002, 339 p. (in Russ.).
10. Pryadein V.P. *Psychodiagnostics of Personality: Selected Psychological Methods and Tests*. Surgut, SurSPU Publ., 2014, 245 p. (in Russ.).
11. Karpenko A.P. *Modern Search Engine Optimization Algorithms. Nature-Inspired Algorithms*. Moscow, 2017, 446 p. (in Russ.).
12. Matrenin P.V. *Development of Adaptive Algorithms for Swarm Intelligence in the Design and Management of Technical Systems*. Novosibirsk, 2018, 197 p. (in Russ.).
13. Yanukovich S.P. Method of managing the process of learning information technologies on the basis of swarm intelligence algorithms. *Informatics and Education*, 2019, no. 7, pp. 32–41 (in Russ.). DOI: 10.32517/0234-0453-2019-34-7-32-41.
14. Baktybaev Zh.Sh. Use of Bloom's taxonomy technology in the university educational process. *Yaroslavl Pedagogical Bull.*, 2017, no. 1, pp. 150–153. Available at: [http://vestnik.yspu.org/releases/2017\\_1/31.pdf](http://vestnik.yspu.org/releases/2017_1/31.pdf) (accessed January 15, 2020) (in Russ.).

#### Для цитирования

Борисов В.В., Янукович С.П., Мрочек Т.В., Ореховский Д.С. Программный комплекс управления подготовкой ИТ-специалистов SkillsForYou // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 177–185. DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185.

#### For citation

Borisov V.V., Yanukovich S.P., Mrochek T.V., Orekhovsky D.S. Software complex SkillsForYou for the IT specialists training management. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 177–185 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185.

УДК 004.02 + 004.855.5(6)  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.186-194

Дата подачи статьи: 20.12.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 186–194

## **Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0**

Сай Ван Квонг<sup>1</sup>, аспирант, [svcionghvktqs@gmail.com](mailto:svcionghvktqs@gmail.com)

М.В. Щербakov<sup>1</sup>, д.т.н., старший научный сотрудник, [maxim.shcherbakov@gmail.com](mailto:maxim.shcherbakov@gmail.com)

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград, 400005, Россия

Правильно сформированная стратегия технического обслуживания и ремонта оборудования играет критическую роль в современных экономических условиях, характеризующихся высоким уровнем конкуренции.

В последнее время в рамках внедрения концепции Индустрия 4.0 в области организации технического обслуживания и ремонта сложных многообъектных систем наиболее перспективными представляются подходы, основанные на использовании передовых методов анализа больших массивов данных на базе инновационных технологий искусственного интеллекта. В основном речь идет о концепции предсказательного технического обслуживания, а именно о создании предсказательных моделей для предотвращения отказов оборудования. Такая стратегия технического обслуживания и ремонта позволяет переходить от грубого планового обеспечения к обеспечению функционирования по состоянию с учетом прогнозирования изменений состояния систем с целью достижения их максимальной производительности при минимальных затратах. В данной работе рассматриваются ключевые элементы для реализации концепции предсказательного технического обслуживания.

В результате авторами предложена архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0. Система включает в себя три модуля: оффлайн-анализа накопленных данных, онлайн-анализа потоковых данных и поддержки принятия решений. Основными функциями первых двух модулей являются раннее обнаружение и прогнозирование отказов оборудования на основе обработки сенсорных данных с использованием методов машинного обучения. На основе информации, полученной из модуля онлайн-анализа, в модуле поддержки принятия решений формируются оптимальные решения при выборе стратегии воздействия на оборудование при необходимости. Такие решения соблюдают оптимальный баланс между затратами на проведение технологических воздействий и величиной потенциальных ущербов и рисков от отказа оборудования.

**Ключевые слова:** интернет вещей, промышленный интернет вещей, предсказательное обслуживание, поддержка принятия решений, искусственный интеллект.

Обеспечение работоспособности оборудования с минимальными затратами всегда является актуальной задачей для различных производств. По статистике, из-за неэффективного обслуживания наблюдается двукратный рост расходов на обеспечение функционирования оборудования [1].

Быстрое развитие промышленности и информационно-коммуникационных технологий обусловило усложнение технических систем и оборудования. Нередко это приводит к нарушению нормального функционирования небольшого объекта инфраструктуры и, таким образом, к нарушению работы всей системы в целом. Отказ машинных агрегатов может повлечь за собой возникновение аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным ущербом. Класси-

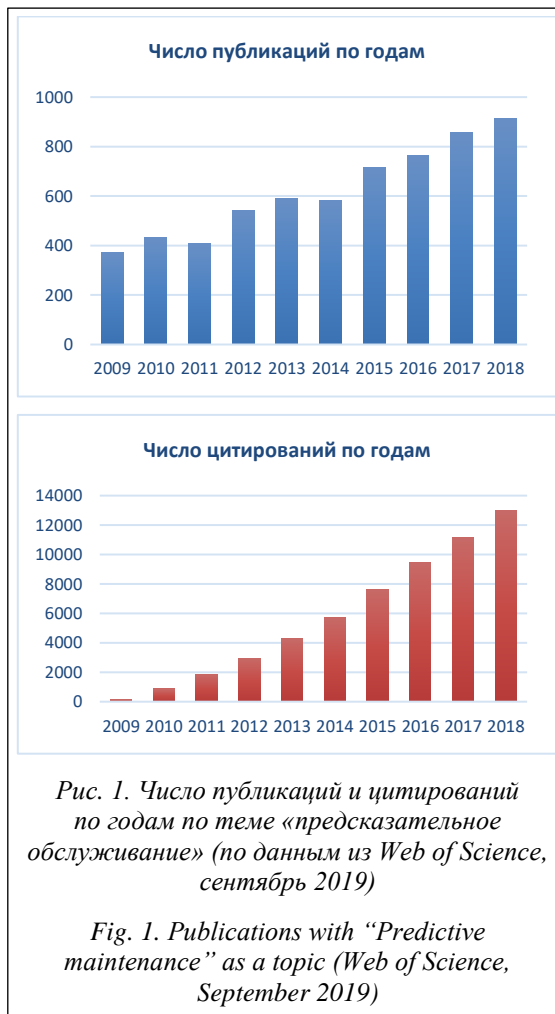
ческие подходы к организации *технического обслуживания и ремонта оборудования* (ТОиР) (корректирующее и планово-профилактическое техническое обслуживание) в таких условиях в значительной мере теряют свою эффективность и не удовлетворяют требованиям современной промышленности.

В корректирующем техническом обслуживании ТОиР выполняется после возникновения отказа. Данный подход также известен как реактивное техническое обслуживание и подходит только в том случае, если последствия отказа незначительны, время его восстановления небольшое и нет риска безопасности. Однако это невозможно соблюсти одновременно в современных отраслях промышленного производства [2].

В планово-профилактическом обслуживании (time-based maintenance – ТВМ) проведение ТОиР предусматривается по истечении определенного времени, которое определяется календарным интервалом и зависит от условий эксплуатации. Достоинством такого метода по сравнению с реактивным обслуживанием является снижение вероятности внезапного отказа оборудования. Однако эта система не лишена недостатков, поскольку зачастую выполняются ремонты фактически исправного оборудования, то есть проводятся «излишние» ремонты, что приводит к большим затратам [1]. Кроме того, эта система не гарантирует безотказную работу оборудования, поскольку большинство отказов носят случайный характер, о чем свидетельствуют результаты масштабных исследований механизмов отказов, проведенных американской авиакомпанией United Airlines (UAL), военно-морским флотом США и другими организациями [3]. Эти исследования показали, что от 70 до 90 % видов отказов не связаны с наработкой оборудования, то есть отказы не соответствуют представлению, принятому практикой ТВМ.

Анализ работ [1, 4, 5] позволил сделать вывод, что в современных экономических условиях наиболее эффективной и целесообразной стратегией технического обслуживания является предсказательное обслуживание. В последнее время оно становится все более важным, о чем свидетельствует значительное увеличение количества публикаций по этой теме. На рисунке 1 показана динамика числа публикаций и цитирований по теме «предсказательное обслуживание» в период 2009–2018 гг. Поиск проводился по ключевым словам «предсказательное обслуживание» в БД платформы Web of Science. Рисунок показывает, что в данный период число публикаций и цитирований по теме «предсказательное обслуживание» постоянно увеличивалось.

Основой предсказательного обслуживания является техническое обслуживание по техническому состоянию, то есть оно выполняется только в случае необходимости. Предсказательное обслуживание может быть описано как интеллектуальный способ максимизации доступности машины и относится не только к стратегиям для раннего обнаружения и прогнозирования состояния, ухудшения производительности системы, но и для принятия необходимых воздействий, соответствующих распознаванию и предсказанию этих случаев. Данная стратегия направлена на снижение ко-



личества необоснованных ремонтных воздействий с целью максимального использования ресурса оборудования за счет разработки и внедрения интеллектуальных систем, выполняющих функции предсказательной аналитики [1]. Такой подход позволяет выполнять обслуживание наиболее эффективным с экономической точки зрения образом и перейти к ремонту по состоянию и к увеличенному межремонтному интервалу. В идеале предсказательное обслуживание позволяет выполнять только правильные работы, сводя к минимуму расход запасных частей, время простоя и время обслуживания.

На рисунке 2 наглядно показана разница между вышеописанными подходами к организации ТОиР (обслуживание по факту отказа, профилактическое и предсказательное обслуживание).

В связи с тенденцией развития умного производства и информационно-коммуникационных технологий компании все чаще стали применять различные типы датчиков и информа-

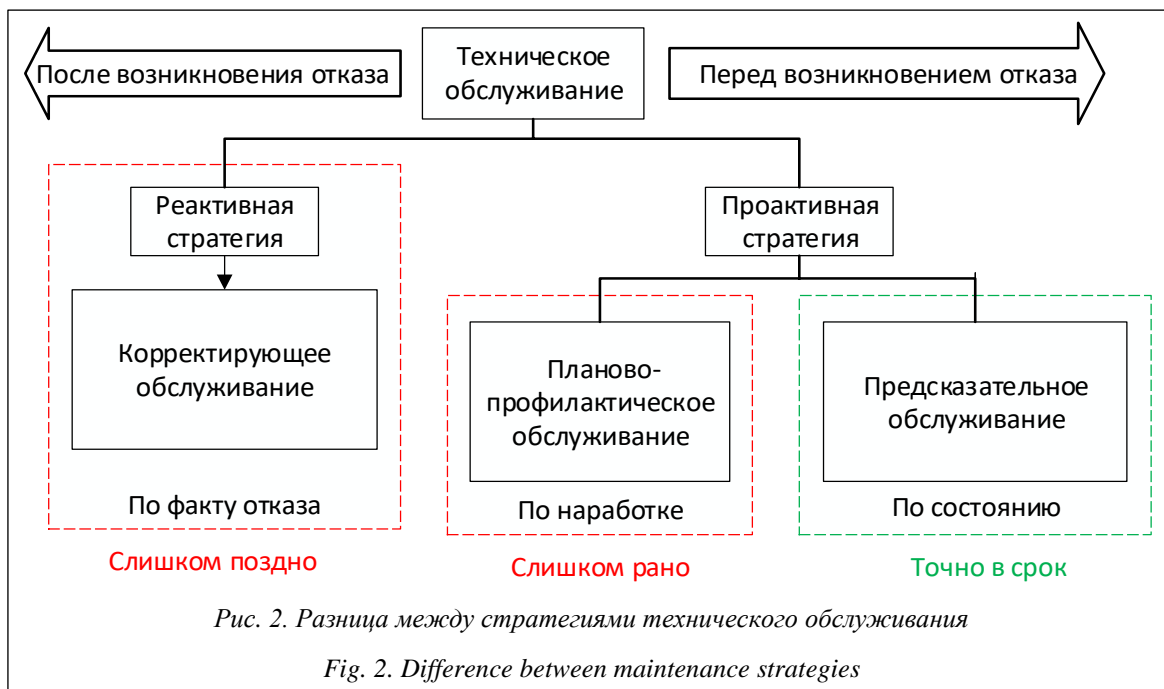


Рис. 2. Разница между стратегиями технического обслуживания

Fig. 2. Difference between maintenance strategies

ционных технологий для захвата данных на всех этапах производства. Одновременно такие технологии, как интернет вещей, промышленный интернет вещей, облачные и туманные технологии, искусственный интеллект и интеллектуальный анализ данных, которые присущи Индустрии 4.0, являются решающим фактором для успешной реализации проактивной стратегии технического обслуживания – предсказательного обслуживания.

В данной работе рассматриваются ключевые элементы для реализации проактивной стратегии технического обслуживания – предсказательного обслуживания. В результате предложена архитектура системы предсказательного технического обслуживания на основе обработки накопленных данных и потоковых данных в концепции Индустрии 4.0.

### Обзор исследований

Стандарт EN 13306 определяет предсказательное обслуживание как обслуживание по техническому состоянию, которое осуществляется на основе прогнозов, полученных из анализа и оценки существенных параметров деградации изделия. Его основная цель – диагностика и прогнозирование отказов и неисправностей оборудования.

Для диагностики и прогнозирования отказов в предсказательном обслуживании было представлено много методов. В основном их можно разделить на два типа – *методы, осно-*

*ванные на обработке данных (МОД), и методы, основанные на моделях (МОМ) [6].*

МОМ используют математические модели для описания физического поведения и процессов деградации оборудования, при этом значения параметров изменяются на основе собранных данных [7, 8]. Наиболее часто используемыми МОМ являются модели марковского процесса [9], винеровского процесса [9], гауссовой смеси [10] и т.д. Основным недостатком МОМ заключается в необходимости регулярной структурной и параметрической оптимизации моделей из-за динамически меняющегося окружения [11]. Кроме того, сложные системы требуют значительных затрат на создание и настройку МОМ, в том числе и с привлечением экспертов [12]. Для преодоления данных недостатков были предложены и в настоящее время активно развиваются методы, основанные на использовании данных [13].

МОД описывают процесс деградации оборудования на основе измеряемых данных с использованием статистических методов или методов искусственного интеллекта [6]. МОД обладают свойствами универсальности, поскольку они абстрагированы от физической природы объектов, не требуют знаний его внутренней структуры и функциональных связей между элементами [14]. Часто используемыми статистическими методами являются регрессионные модели, метод главных компонент, анализ выживаемости и т.д. Пространственные модели состояний, такие как скрытые

марковские модели или скрытые полумарковские модели, динамические байесовские сети и прочие, также являются широко используемыми статистическими методами. Методы искусственного интеллекта – это обычно различные варианты методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей, таких как нейронные сети долгой краткосрочной памяти, сверточные нейронные сети и т.д. Для применения МОМ требуется решить две важные задачи – сбор данных и их обработка.

**Сбор данных.** В работе [15] описывается сбор данных как процесс получения и хранения полезных данных от целевых физических активов для обслуживания по техническому состоянию. Собранные данные могут быть разделены на два типа – данные мониторинга состояния и событийные данные. В [16] определено, что данные мониторинга состояния, как и любые данные, в том числе эксплуатационные, данные о производительности, об окружающей среде, сигналы деградации, можно использовать для прогнозирования состояния оборудования для предотвращения отказов. Событийные данные включают информацию о том, что произошло с целевыми физическими активами. Событийные данные и данные мониторинга состояния играют исключительную роль в обслуживании по техническому состоянию.

Развитие и удешевление повсеместных систем сбора данных и удешевление систем сбора данных, в том числе в дистанционном режиме и в реальном масштабе времени, позволяют собирать большие объемы данных о многообъектных целевых системах. Однако данные хранятся и обрабатываются в различных и неоднородных системах, таких как компьютеризированные системы управления техническим обслуживанием для ведения учета технического обслуживания, системы мониторинга состояния активов и системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA для управления мониторингом процессов и управления активами [17, 18]. В работе [19] утверждается, что объединение компьютеризированных систем управления техническим обслуживанием, систем мониторинга и управления знаниями по техническому обслуживанию является ключевой частью технологии технического обслуживания в будущем.

**Обработка данных.** В любом приложении, основанном на данных в общем и для предсказательного обслуживания в частности, обработка данных имеет первостепенное значение [20]. Необходимость обработки исходных

данных может быть вызвана разными причинами, например, некоторые статистические методы требуют, чтобы все предикторы измерялись в одинаковых единицах. В других случаях качество предсказательных моделей может в значительной мере зависеть от характера распределения данных или наличия выбросов. В общем, процесс обработки данных включает в себя следующие шаги: очистка данных, обработка пропущенных значений, нормализация данных, преобразование данных, инженерия признаков.

Основная цель очистки данных – выявление и удаление ошибок, выбросов и повторяющихся данных для улучшения их качества. Существует огромное количество методов обнаружения выбросов, такие как статистические, машинного обучения, подмены задачи, метрические методы и другие.

Большинство алгоритмов машинного обучения очень чувствительны к шкалированию данных. Поэтому для получения максимальной точности от алгоритмов машинного обучения чаще всего осуществляется нормализация или преобразование исходных данных перед запуском алгоритмов. Некоторыми известными методами преобразования данных являются преобразование по методу Vox–Cox, логарифмическое преобразование, нормализация  $\min$ - $\max$ , центрирование и т.д. [21].

Часто в реальных данных присутствуют пропуски, в результате чего возникает необходимость обработки этих пропусков. Существуют два подхода к решению данной задачи: игнорирование объектов, имеющих пропуски, и замена специальными значениями с помощью различных методов, таких как метод ближайших соседей, метод случайного леса, метод  $k$  средних и другие [22].

Инженерия признаков является самым важным и творческим процессом отбора и создания признаков с целью поиска оптимальных подмножеств, на которых построенная модель дает наилучшее качество. Для этой цели используются методы рекурсивного исключения признаков, главных компонент и другие [23].

#### **Предлагаемая архитектура системы предсказательного технического обслуживания в концепции Индустрии 4.0**

На рисунке 3 отображена структура предложенной системы предсказательного технического обслуживания на основе обработки накопленных данных и потоковых данных в

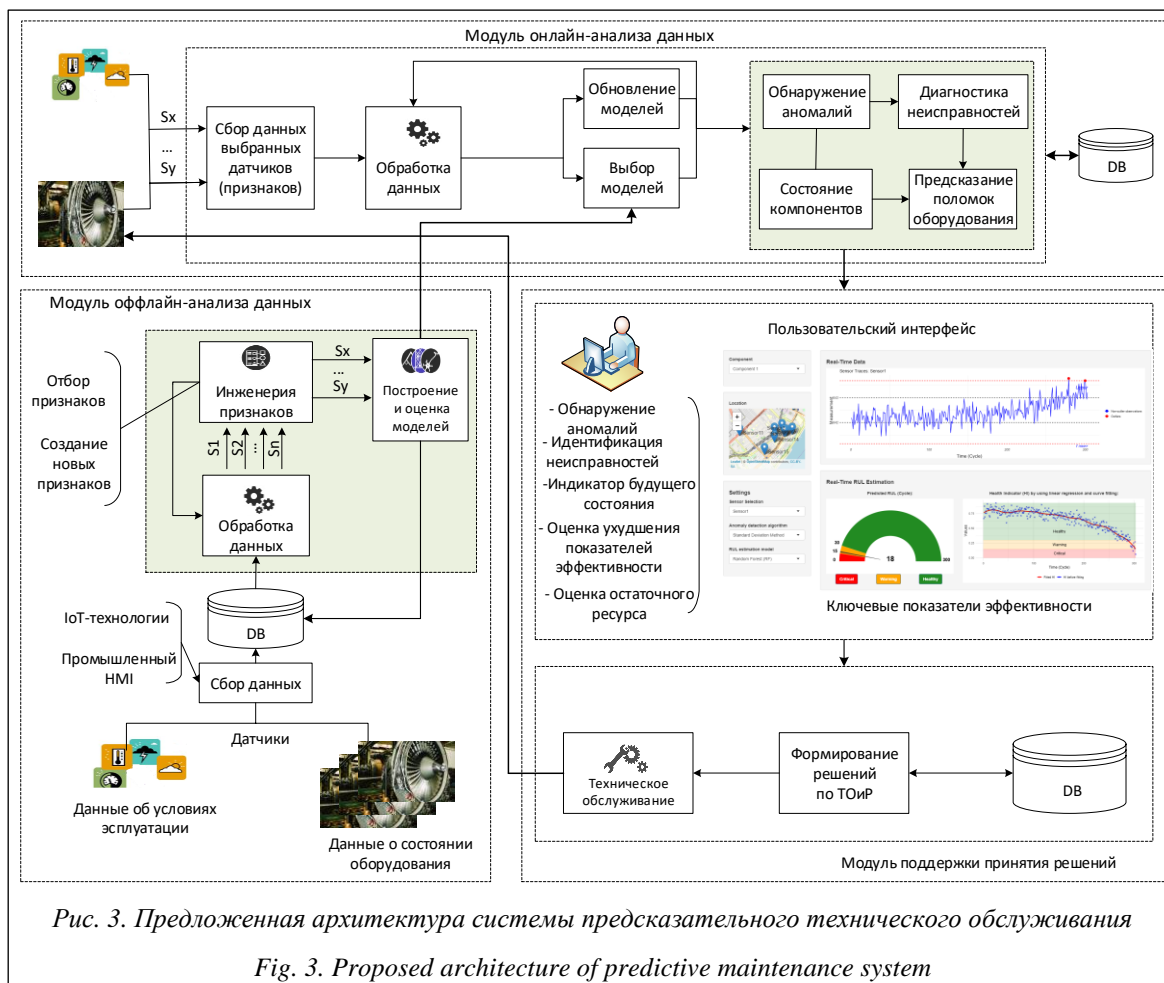


Рис. 3. Предложенная архитектура системы предсказательного технического обслуживания

Fig. 3. Proposed architecture of predictive maintenance system

концепции Индустрии 4.0, которая состоит из трех методологических модулей: оффлайн-анализа данных, онлайн-анализа данных, поддержки принятия решений.

Первым важным элементом для развертывания этой системы является процесс мониторинга и сбора данных о поведении анализируемой системы. Этот процесс осуществляется на основе технологий интернета вещей или промышленного интернета вещей. Для обеспечения работы предложенной системы могут использоваться данные мониторинга состояния оборудования и эксплуатационных условий, такие как вибрация от акселерометров, температура и т.д., а также событийные данные о неисправностях, отказах, воздействиях по техническому обслуживанию и т.д. Перед сбором данных важно определить: а) критические компоненты системы (эта задача выполняется на основе различных видов анализа, таких как функциональный анализ, дисфункциональный анализ, анализ критичности, накопленный опыт и другие [24]); б) физические параметры, необходимые для наблюдения; в) датчики для

отслеживания процесса деградации оборудования.

После сбора полученные данные будут храниться в системах БД для последующей обработки.

**Модуль оффлайн-анализа данных** осуществляет анализ исторически накопленных данных, полученных из однотипных систем с использованием различных алгоритмов машинного обучения, глубоких нейронных сетей и технологий инженерии признаков, преобразования данных для формирования моделей, позволяющих раннее обнаружение и диагностику неисправностей, прогнозирование остаточного ресурса оборудования и т.д. Эти модели оцениваются и выбираются для последующего использования в модуле онлайн-анализа данных.

Известно много подходов искусственного интеллекта, используемых для создания предсказательных моделей. В работе [1] были исследованы различные алгоритмы для прогнозирования остаточного ресурса, такие как метод опорных векторов (SVM), деревья решений



(CART), случайный лес (RF), экстремальный метод градиентного бустинга (XGBoost), сети долгой краткосрочной памяти (Long short-term memory, LSTM), сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network, CNN) и т.д. В работе [25] изучены алгоритмы для раннего обнаружения неисправностей для предсказательного обслуживания, такие как скрытые марковские модели, модель ARIMA, LSTM-автоэнкодеры и другие.

**Модуль онлайн-анализа данных** осуществляет сбор новых данных в реальном времени только из критических компонентов, выбранных на основе анализа в модуле оффлайн-анализа данных. Выбранные из модуля оффлайн-анализа данных модели используются для определения и прогнозирования состояния оборудования в реальном времени.

Однако эти модели в процессе использования на потоковых данных в реальном времени могут устареть в силу многих факторов, например, возможности возникновения новых типов неисправностей, на которых модели не обучались в прошлом. Поэтому возникает необходимость переобучения и обновления моделей. Модуль онлайн-анализа данных предложенной системы предусматривает решение и этой проблемы.

**Модуль принятия решений по ТОиР.** Основной целью этого модуля является оптимальное планирование воздействий по ТОиР. Информация, полученная в процессе диагностики и прогностики в модуле онлайн-анализа данных, используется для выработки рекомендаций по оптимальному использованию оборудования в режиме онлайн. В этом модуле

предоставляется пользовательский интерфейс, обеспечивающий передачу информации между пользователем-человеком и программно-аппаратными компонентами системы о результатах процесса анализа (обнаружение/диагностика/прогностика), а также визуализации потоковых данных в реальном времени. На их основе при необходимости формируются оптимальные воздействия по ТОиР.

### Заключение

В данной работе рассматриваются ограничения классических подходов (корректирующее и профилактическое обслуживание) к организации ТОиР и преимущества проактивной стратегии технического обслуживания на основе обработки накопленных и потоковых данных – предсказательного обслуживания. Анализируются ключевые элементы для реализации предсказательного обслуживания. В результате предложена архитектура интеллектуальной системы технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0. Эта системная архитектура учитывает предварительный оффлайн-анализ собранных накопленных и онлайн-анализ потоковых данных для раннего обнаружения возникновения возможных отказов, прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Дальнейшая работа будет направлена на последующее развитие нескольких модулей архитектуры системы и их развертывание в реальных промышленных производственных подразделениях для технического обслуживания сложных многообъектных систем.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-47-340010 r\_a.*

### Литература

1. Сай Ван Квонг, Щербаков М.В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 1. С. 33–44.
2. Wang Y., Deng C., Wu J., Wang Y., Xiong Y. A corrective maintenance scheme for engineering equipment. *Engineering Failure Analysis*, 2014, no. 36, pp. 269–283.
3. Allen T.M. Us navy analysis of submarine maintenance data and the development of age and reliability profiles. URL: <https://www.plant-maintenance.com/articles/SubmarineMaintenanceDataRCM.pdf> (дата обращения: 15.12.2019).
4. Houry E., Deloux E., Grall A., Berenguer C. On the use of time-limited information for maintenance decision support: a predictive approach under maintenance constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, no. 2, pp. 1–11.
5. Huang Z.Y., Xu Z.G., Wang W.H., and Sun Y.X. Remaining useful life prediction for a nonlinear heterogeneous Wiener process model with an adaptive drift. *IEEE Trans. Rel.*, 2015, vol. 64, no. 2, pp. 687–700.
6. Ying Peng, Ming Dong, Ming Jian Zuo. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, no. 50, pp. 297–313. DOI: 10.1007/s00170-009-2482-0.

7. Hanachi H., Liu J., Banerjee A., Chen Y., Koul A. A physics-based modeling approach for performance monitoring in gas turbine engines. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, vol. 64, no. 1, pp. 197–205.
8. Dui H., Si S., Zuo M., Sun S. Semi-Markov process-based integrated importance measure for multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, vol. 2, no. 64, pp. 754–765.
9. Khoury E., Deloux E., Grall A., Berenguer C. On the use of time-limited information for maintenance decision support: a predictive approach under maintenance constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, no. 2, pp. 1–11. DOI: 10.1155/2013/983595.
10. Zhang L., Li X., Yu J. A review of fault prognostics in condition based maintenance. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6357. DOI: 10.1117/12.717514.
11. Liu J., Saxena A., Goebel K., Saha B., Wang W. An adaptive recurrent neural network for remaining useful life prediction of lithiumion batteries. *Proc. Annual Conf. of the Prognostics and Health Management Society*, 2010, pp. 1–9.
12. Yaguo L., Naipeng Li, Gontarz S., Lin J., Radkowski S., Dybala J. A model-based method for remaining useful life prediction of machinery. *IEEE Transactions on Reliability*, 2016, no. 65, pp. 1–13.
13. Goebel K., Saha B., Saxena A., Celaya J.R., Christophersen J.P. Prognostics in battery health management. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2008, vol. 8, pp. 33–40.
14. Liu J., Wang W., Golnaraghi F. A multi-step predictor with a variable input pattern for system state forecasting. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2009, vol. 23, pp. 1586–1599.
15. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2006, vol. 7, no. 20, pp. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
16. Si X.S., Wang W., Hu C.H., Zhou D.H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *Europ. J. of Operational Research*, 2011, no. 213, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
17. Galar D., Kumar U., Juuso E., Lahdelma S. Fusion of maintenance and control data: a need for the process. *Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing*, 2012. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1001796/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 15.12.2019).
18. Galar D., Kans M., Schmidt B. Big data in asset management: knowledge discovery in asset data by the means of data mining. *Proc. 10th WCEAM*, Cham, Springer, 2015, pp. 161–171. DOI: 10.1007/978-3-319-27064-7.
19. BJORLING S.E., BAGLEE D., GALAR D., SINGH S. Maintenance knowledge management with fusion of CMMS and CM. *Proc. DMIN Intern. Conf. Data Mining, Las Vegas*, 2013. URL: [https://www.researchgate.net/publication/311844431\\_Maintenance\\_Knowledge\\_Management\\_with\\_Fusion\\_of\\_CMMS\\_and\\_CM](https://www.researchgate.net/publication/311844431_Maintenance_Knowledge_Management_with_Fusion_of_CMMS_and_CM) (дата обращения: 15.12.2019).
20. Zhang L., Xiong G., Liu H., Zou H., Guo W. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Syst. Appl.*, 2010, no. 37, pp. 6077–6085.
21. Cernuda C. On the relevance of preprocessing in predictive maintenance for dynamic systems. In: Lughofer E., Sayed-Mouchaweh M. (Eds.). *Predictive Maintenance in Dynamic Systems*. Cham, Springer, 2019, pp. 53–93. DOI: 10.1007/978-3-030-05645-2\_3.
22. Handling missing values in data. URL: [https://r-analytics.blogspot.com/2017/01/blog-post.html#.XO6\\_nlgzZPY](https://r-analytics.blogspot.com/2017/01/blog-post.html#.XO6_nlgzZPY) (дата обращения: 15.12.2019).
23. Feature selection with the Caret R package. URL: <https://machinelearningmastery.com/feature-selection-with-the-caret-r-package/> (дата обращения: 15.12.2019).
24. Gouriveau R., Medjaher K., Zerhouni N. From prognostics and health systems management to predictive maintenance 1: Monitoring and prognostics. Wiley, 2016, 182 p. DOI: 10.1002/9781119371052.
25. Kuzin T., Borovicka T. Early Failure Detection for Predictive Maintenance of Sensor Parts. *CEUR Workshop Proc.*, 2016, pp. 123–130.

### Architecture of predictive maintenance system of complex multi-object systems in Industry 4.0 concept

**Sai Van Cuong**<sup>1</sup>, *Postgraduate Student, svcuonghvkts@gmail.com*

**M.V. Shcherbakov**<sup>1</sup>, *Dr.Sc. (Engineering), Senior Researcher, maxim.shcherbakov@gmail.com*

<sup>1</sup> *Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation*

**Abstract.** Properly formed strategy of maintenance of equipment plays a critical role in modern economic conditions characterized by crisis phenomena and high levels of competition.

Recently, as part of the implementation of the concept of Industry 4.0 in the field of maintenance of complex multi-object systems, the most promising approaches are based on the use of advanced methods for analyzing large data based on innovative artificial intelligence technologies. It is mainly about the concept of predictive maintenance (PdM), namely the creation of predictive models to prevent equipment failures. This maintenance strategy allows to move from time-based maintenance to condition based maintenance, taking into account the prediction of changes in system states in order to achieve their maximum performance at minimal cost. Therefore, this paper discusses the key elements for implementing the PdM strategy.

As a result, an architecture for predictive maintenance of complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0 is proposed. The proposed system includes three modules: an offline-analysis module for accumulated data, an online-analysis module for streaming data, and a decision support module. The main functions of the first two modules are early detection and prediction of equipment failure based on machine learning methods. Based on the information received from the online analysis module, the decision support module generates optimal decisions when choosing a strategy for influencing the equipment, if necessary. Such solutions maintain an optimal balance between the cost of performing technological impacts and the magnitude of potential damages and risks from equipment failure.

**Keywords:** Internet of thing, industrial Internet of things, predictive maintenance, decision making support, artificial intelligence.

**Acknowledgements.** This work was with financial support by RFBR, project no. 19-47-340010 r\_a.

### References

1. Sai Van Cuong, Shcherbakov M.V. A data-driven method for remaining useful life prediction of multiple-component systems. *Caspian J.: Control and High Technologies*, 2019, no. 1, pp. 33–44.
2. Wang Y., Deng C., Wu J., Wang Y., Xiong Y. A corrective maintenance scheme for engineering equipment. *Engineering Failure Analysis*, 2014, no. 36, pp. 269–283.
3. Allen T.M. *Us Navy Analysis of Submarine Maintenance Data and the Development of Age and Reliability Profiles*. Available at: <https://www.plant-maintenance.com/articles/SubmarineMaintenanceDataRCM.pdf> (accessed December 15, 2019).
4. Khoury E., Deloux E., Grall A., Berenguer C. On the use of time-limited information for maintenance decision support: a predictive approach under maintenance constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, no. 2, pp. 1–11.
5. Huang Z.Y., Xu Z.G., Wang W.H., and Sun Y.X. Remaining useful life prediction for a nonlinear heterogeneous Wiener process model with an adaptive drift. *IEEE Trans. Rel.*, 2015, vol. 64, no. 2, pp. 687–700.
6. Ying Peng, Ming Dong, Ming Jian Zuo. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, no. 50, pp. 297–313. DOI: 10.1007/s00170-009-2482-0.
7. Hanachi H., Liu J., Banerjee A., Chen Y., Koul A. A physics-based modeling approach for performance monitoring in gas turbine engines. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, vol. 64, no. 1, pp. 197–205.
8. Dui H., Si S., Zuo M., Sun S. Semi-Markov process-based integrated importance measure for multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, vol. 2, no. 64, pp. 754–765.
9. Khoury E., Deloux E., Grall A., Berenguer C. On the use of time-limited information for maintenance decision support: a predictive approach under maintenance constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, no. 2, pp. 1–11. DOI: 10.1155/2013/983595.
10. Zhang L., Li X., Yu J. A review of fault prognostics in condition based maintenance. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6357. DOI: 10.1117/12.717514.
11. Liu J., Saxena A., Goebel K., Saha B., Wang W. An adaptive recurrent neural network for remaining useful life prediction of lithiumion batteries. *Proc. Annual Conf. of the Prognostics and Health Management Society*, 2010, pp. 1–9.
12. Yaguo L., Naipeng Li, Gontarz S., Lin J., Radkowski S., Dybala J. A model-based method for remaining useful life prediction of machinery. *IEEE Transactions on Reliability*, 2016, no. 65, pp. 1–13.
13. Goebel K., Saha B., Saxena A., Celaya J.R., Christophersen J.P. Prognostics in battery health management. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2008, vol. 8, pp. 33–40.
14. Liu J., Wang W., Golnaraghi F. A multi-step predictor with a variable input pattern for system state forecasting. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2009, vol. 23, pp. 1586–1599.

15. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2006, vol. 7, no. 20, pp. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
16. Si X.S., Wang W., Hu C.H., Zhou D.H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *Europ. J. of Operational Research*, 2011, no. 213, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
17. Galar D., Kumar U., Juuso E., Lahdelma S. Fusion of maintenance and control data: a need for the process. *Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing*, 2012. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1001796/FULLTEXT01.pdf> (accessed December 15, 2019).
18. Galar D., Kans M., Schmidt B. Big data in asset management: knowledge discovery in asset data by the means of data mining. *Proc. 10th WCEAM*, Cham, Springer, 2015, pp. 161–171. DOI: 10.1007/978-3-319-27064-7.
19. Bjorling S.E., Baglee D., Galar D., Singh S. Maintenance knowledge management with fusion of CMMS and CM. *Proc. DMIN Intern. Conf. Data Mining*, Las Vegas, 2013. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/311844431\\_Maintenance\\_Knowledge\\_Management\\_with\\_Fusion\\_of\\_CMMS\\_and\\_CM](https://www.researchgate.net/publication/311844431_Maintenance_Knowledge_Management_with_Fusion_of_CMMS_and_CM) (accessed December 15, 2019).
20. Zhang L., Xiong G., Liu H., Zou H., Guo W. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Syst. Appl.*, 2010, no. 37, pp. 6077–6085.
21. Cernuda C. On the relevance of preprocessing in predictive maintenance for dynamic systems. In: Lughofer E., Sayed-Mouchaweh M. (Eds.). *Predictive Maintenance in Dynamic Systems*. Cham, Springer, 2019, pp. 53–93. DOI: 10.1007/978-3-030-05645-2\_3.
22. *Handling Missing Values in Data*. Available at: [https://r-analytics.blogspot.com/2017/01/blog-post.html#XO6\\_nlgzZPY](https://r-analytics.blogspot.com/2017/01/blog-post.html#XO6_nlgzZPY) (accessed December 15, 2019).
23. *Feature Selection with the Caret R Package*. Available at: <https://machinelearningmastery.com/feature-selection-with-the-caret-r-package/> (accessed December 15, 2019).
24. Gouriveau R., Medjaher K., Zerhouni N. *From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance I: Monitoring and Prognostics*. Wiley, 2016, 182 p. DOI: 10.1002/9781119371052.
25. Kuzin T., Borovicka T. Early Failure Detection for Predictive Maintenance of Sensor Parts. *CEUR Workshop Proc.*, 2016, pp. 123–130.

#### Для цитирования

Сай Ван Квонг, Щербаков М.В. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 186–194. DOI: 10.15827/0236-235X.130.186-194.

#### For citation

Sai Van Cuong, Shcherbakov M.V. Architecture of predictive maintenance system of complex multi-object systems in Industry 4.0 concept. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 186–194 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.186-194.

УДК 004.896, 681.5  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.195-203

Дата подачи статьи: 15.11.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 195–203

## **Проблема специализации в иерархических обучающих системах управления на примере задачи фуражировки**

*Е.Е. Овсянникова*<sup>1</sup>, инженер-исследователь, *eeovsyana@gmail.com*

*М.А. Ровбо*<sup>1</sup>, инженер-исследователь, *rovbota@gmail.com*

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, 123182, Россия*

В статье рассматривается проблема специализации в мультиагентной системе, состоящей из одинаковых, способных к обучению агентов, для которой в поставленной задаче можно выделить слабо связанные подцели.

Была предложена и рассмотрена иерархическая система управления с обучением на задаче фуражировки с различными типами ресурсов, основанная на  $\epsilon$ -жадном Q-обучении. Перед группой изначально одинаковых агентов стоит задача сбора на базу нескольких типов ресурсов, расположенных в среде, при этом ресурсы требуется собирать в определенной пропорции и награда дается лишь за транспортировку на базу недостающего ресурса.

Предложенная система управления состоит из нескольких уровней. Верхний уровень отвечает за выбор типа ресурса, который агент собирает и приносит на базу, нижний – за выбор алгоритмов, каждый из которых способен к обучению и определяет навык сбора определенного типа ресурса. Таким образом, в подобной многоагентной системе иерархия в управлении позволяет изначально одинаковым агентам формировать в течение работы разные навыки по сбору ресурсов.

Рассматриваемая гипотеза состоит в том, что, несмотря на отсутствие в задаче предпосылок к оптимизации путем специализации (идеально работающие агенты могли бы собирать разные ресурсы попеременно), возникающая в ходе работы разница в накопленном опыте может сделать специализацию разных агентов на разных ресурсах более эффективной. Результаты были получены с помощью вычислительного эксперимента на компьютерной модели. Эффект специализации наблюдался при определенных условиях. Также была отмечена стабилизация эффективности работы многоагентной системы за счет специализации и введения иерархии в систему управления.

**Ключевые слова:** обучение с подкреплением, многоагентная система, робототехника, фуражировка, специализация.

Проблема построения группы обучающихся автоматических систем управления рассматривается исследователями с разных сторон [1], включая возможность совместного обучения в группе, передачи опыта обучения из схожих задач, совместного решения задачи без прямого взаимодействия, что свойственно роевым системам.

Алгоритмы управления на основе теории функциональных систем используют иерархические структуры, в которых различные уровни отвечают разной степени детализации ситуации или решаемой подзадачи [2, 3]. То же свойство можно обнаружить и у систем управления на основе семиотических моделей, в которых иерархия проявляется в планировании на уровне семиотической сети, в свою очередь, содержащей описания действий в отдельных узлах [4, 5], а также у некоторых видов алго-

ритмов обучения с подкреплением, показывающих результаты на сложных задачах [6]. Иерархическое построение алгоритмов управления давно известно и применяется в разных формах, однако сейчас можно выделить проблему использования обучения в иерархических системах управления, например, в BDI агентах [7], и интеграции иерархии в обучающиеся алгоритмы, как правило, для ускорения обучения, путем выделения значимых элементов задачи, примером чего являются опции в обобщении обучения с подкреплением [8]. Иерархические алгоритмы управления также могут использоваться для повышения интерпретируемости работы системы [9], для чего применяется автоматическое построение иерархического алгоритма по уже обученному другому алгоритму, при этом эффективность работы в целом сохраняется.

В работе [10] рассматривается задача фуражировки с одним ресурсом и весьма простым механизмом адаптации, в которой агенты учились находить самую эффективную пропорцию в группе между разными, заранее определенными ролями. В этой же работе исследуется более сложная задача – каким образом может возникнуть специализация с разными ролями в изначально гомогенной мультиагентной системе.

В данной статье на относительно простом примере предлагается рассмотреть, каким образом обучающиеся агенты без прямой коммуникации могут повысить эффективность выполнения групповой задачи путем выделения ролей и таким образом избежать затрат, связанных с временем обучения каждым агентом всем необходимым для решения целевой задачи подзадачам.

Перед группой одинаковых в начале работы системы агентов стоит задача сбора на базу нескольких типов ресурсов, расположенных в среде. При этом ресурсы требуется собирать в определенной пропорции (в простейшем случае поровну) и награда дается лишь за принос на базу недостающего ресурса. Особенность рассмотренной проблемы также заключается в том, что агентам необходимо научиться приносить каждый из ресурсов в отдельности, а также тому, что они требуются на базе не всегда.

### Постановка задачи

Для исследования эффекта специализации необходимо выбрать задачу, в которой целевой критерий работы системы создает зависимость между действиями различных агентов и существуют разные подцели. В силу направленности исследования на приложения мобильной робототехники задача должна предусматривать перемещение агентов в пространстве и выполнение в нем каких-либо задач, связанных с их положением. Распространенной задачей, на которой можно исследовать группы мобильных агентов, является фуражировка. Ее наиболее известная постановка описывает дискретный мир, в котором агенты перемещаются по прямоугольной сетке и собирают расположенные в клетках ресурсы. При этом некоторые клетки проходимы, а некоторые содержат препятствия. Как правило, по краям мира расположены препятствия, ограничивающие поле. Для удовлетворения указанных выше требований к

постановке задачи необходимо сделать следующие уточнения:

- одна из свободных клеток помечена как гнездо или база – это место, куда агенты должны приносить ресурсы;
- агенты могут перемещаться на одну клетку вверх, вниз, влево и вправо, но не по диагонали;
- существуют фиксированные в пространстве источники нескольких типов ресурсов, и прохождение по ним агентов позволяет собрать этот ресурс (он возобновляется в источниках, то есть всегда там есть);
- агент может нести только один тип ресурса за раз и автоматически оставляет его в гнезде при передвижении на клетку гнезда;
- целью группы является сбор ресурсов в гнездо в равной пропорции, а соответствующая награда выдается агенту только за «нужный» ресурс, то есть такой, которого в гнезде в данный момент меньше (когда их поровну, награда дается за любой ресурс).

Такая постановка позволяет предположить, что эффективным способом сбора ресурсов может быть сбор одним агентом одного ресурса, а другим – другого (при прочих равных условиях, для чего ресурсы стоит сделать одинаково доступными), то есть специализация. Собирать разные ресурсы каждым из агентов может быть невыгодно в силу того, что необходимо обучиться их сбору, поэтому, предположительно, система будет работать эффективнее, когда каждый из агентов будет обучаться собирать один из ресурсов. Однако эффективность такого поведения агентов система должна обнаружить самостоятельно.

Агент принимает на вход локальную информацию: координаты клетки, в которой он находится, нахождение в ней гнезда, статус того, несет ли он ресурс определенного типа, а также награды за принесение ресурса определенного типа и за принесение требуемого типа ресурса в гнездо.

### Система управления

Существует множество алгоритмов управления, способных к обучению, включая групповое обучение [11]. Для исследования в данном случае были выбраны более простые алгоритмы:  $\epsilon$ -жадное Q-обучение и описываемый в данной статье иерархический алгоритм, состоящий из нескольких алгоритмов Q-обучения (один из них выбирает подцель, которую дол-

жен пытаться выполнить агент, а остальные отвечают за решение конкретной подцели). Это позволяет избежать влияния дополнительных эффектов, присущих алгоритмам группового обучения.

Алгоритм  $\epsilon$ -жадного Q-обучения решает задачу оптимизации целевого критерия  $G(S) \doteq \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t$ , где  $r_t$  – награды, получаемые агентом

на шаге  $t$ ;  $\gamma \leq 1$  – коэффициент, влияющий на предпочтение ближайших по времени наград по отношению к удаленным в будущее;  $S$  – текущее состояние (в момент времени  $t = 0$ ) агента. Алгоритм итеративно меняет стратегию выбора действий, то есть функцию выбора действия  $\alpha$ ,  $\pi: S \rightarrow \alpha$ , путем обновления оценки эффективности соответствующей пары состояние–действие, постепенно согласуя ее с реальными наградами в соответствии с формулой  $Q(S, a) \leftarrow Q(S, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(S', a') - Q(S, a))$ , где  $Q(S, a)$  – функция оценки эффективности выбора действия  $a$  в состоянии  $S$  (штрих обозначает следующий момент времени);  $r$  – награда за последний шаг.

Выбор действия осуществляется путем нахождения максимально эффективного в текущей ситуации согласно  $Q$ . С некоторой вероятностью  $\epsilon$  действие выбирается среди всех равновероятно доступных для накопления опыта и обнаружения более эффективных стратегий.

Однако в рассматриваемой задаче агенты не обладают полной информацией о меняющемся состоянии мира: не знают статуса другого агента и количества ресурсов в гнезде. Это усиливает зависимость результата действий одного агента от другого и, вообще говоря, нарушает обычные предположения о допустимости представления задачи, решаемой агентом, как марковского процесса принятия решений. Агент оказывается в среде, в которой одни и те же последовательности действий могут менять свою эффективность (в статистическом смысле получаемую награду) в течение времени из-за действий другого агента. Более того, классический алгоритм Q-обучения в таком представлении задачи не сможет различить ситуацию, в которой агент приносит один ресурс и получает награду, и ситуацию, когда тот же самый ресурс нет смысла нести на базу. Это вынуждает агентов постоянно переучиваться или специализироваться. По этой же причине параметр случайного выбора действий  $\epsilon$  в данном случае выбран неубывающим, как обычно при-

нято для обеспечения теоретической сходимости.

Другой предлагаемый в данной статье алгоритм представляет собой иерархию из мета-алгоритма, выбирающего из действий «принести ресурс А» и «принести ресурс В». Мета-алгоритм принимает на вход только награду за предыдущую операцию и решение о новом действии, когда агент находится в гнезде, из подчиненных ему алгоритмов – навыков, которые работают так, как описано выше, но вместо награды за принесение требуемого ресурса в гнездо получают награду за принесение ассоциированного с ними ресурса. Например, один навык отвечает за доставку ресурса А, другой – за доставку ресурса В. Таким образом, нижний уровень учится выполнять подзадачи сбора конкретных типов ресурсов, а верхний отвечает за оптимизацию принятия решений о необходимом ресурсе. Все алгоритмы являются  $\epsilon$ -жадным Q-обучением.

### Численное моделирование

Рассматриваемая среда и ее начальное состояние изображены на рисунке 1, где препятствия по краям обозначены светло-серыми квадратами, в центре находится гнездо, обозначенное оранжевым, в противоположных углах два источника разных типов ресурсов (круги багрового и оливкового цветов), агенты обозначены кругами розового цвета различной яркости.

Среда представляет собой квадрат размером 7 на 7 с расположенным в центре гнездом и симметрично расставленными по краям ресурсами разных типов. Всего присутствуют два агента и два ресурса. Это обеспечивает равную сложность доставки обоих ресурсов агентами на базу, однако обучаться доставке каждого ресурса приходится отдельно. Агенты стартуют

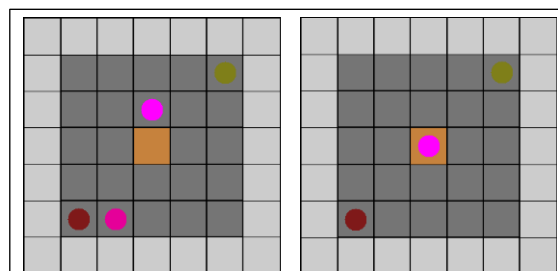


Рис. 1. Рассматриваемая среда задачи (слева) и ее начальное состояние (справа)

Fig. 1. The problem environment under consideration (left) and its starting state (right)

из гнезда с количеством каждого ресурса в гнезде, равным 0. За успешную доставку ресурса агент получает награду 1 за соответствующий ресурс для навыка и целевую награду 1 за выполнение цели, если был доставлен недостающий ресурс.

### Результаты

На рисунках 2 и 3 приведены результаты работы группы агентов с классическим алгоритмом Q-обучения, без иерархии с навыками, для

одного эксперимента. При этом использовались параметры скорости обучения  $\alpha = 0.1$ , важности будущих наград  $\gamma = 0.1$ , вероятности случайного действия  $\epsilon = 0.1$ . Здесь и далее график эффективности показывает суммарные награды за доставку требуемого ресурса в гнездо группой агентов по эпизодам (каждый эпизод состоит из 1 000 шагов). Эксперименты проводились по 200 000 шагов с двумя агентами. Некоторые результаты показаны для одного эксперимента, другие усреднены для каждого эпизода по десяти экспериментам.

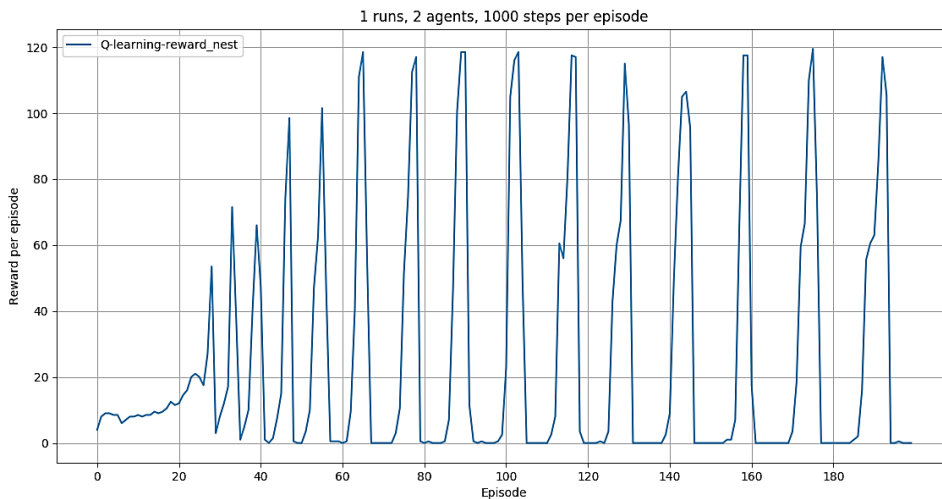


Рис. 2. Эффективность выполнения задачи группой агентов с классическим Q-обучением для  $\gamma = 0.1$

Fig. 2. The problem solution efficiency by a group of agents with classical Q-learning for  $\gamma = 0.1$

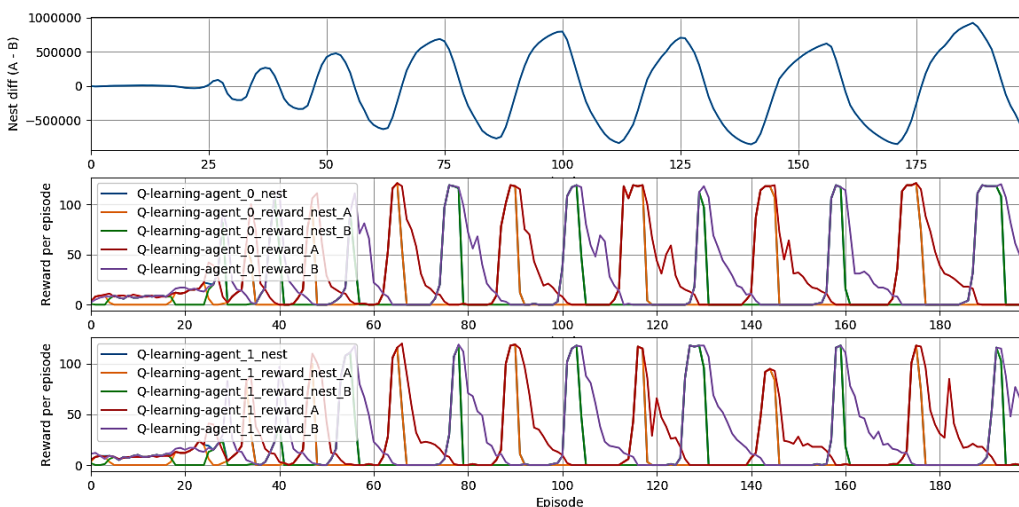


Рис. 3. Динамика сбора ресурсов и навыков агентов с классическим Q-обучением для  $\gamma = 0.1$

Fig. 3. The dynamics of resource collection and agent skills with classical Q-learning for  $\gamma = 0.1$



Графики на рисунке 3 показывают (сверху вниз) разность между количеством ресурса А и ресурса В в гнезде, награды первого агента и награды второго агента. В тех случаях, когда рисунок динамики состоит из четырех графиков, первый из них показывает разность ресурсов в гнезде, а второй – коэффициент специализации, представляющий собой разность между количеством ресурсов А и В, которые соответствующий агент принес за эпизод.

Несмотря на улучшение в результате обучения эффективности работы группы, наблюдается нестабильное поведение системы, при котором агенты собирают сначала один ресурс с избытком, не получая за него награды, после чего компенсируют его интенсивным сбором другого ресурса, за который половину времени получают награду, после чего набирают уже его больше, чем необходимо, что вызывает большие амплитуды колебаний в эффективности.

Усредненные результаты эксперимента (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/15.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/16.jpg>) с этой группой агентов позволяют увидеть, что явление сохраняется, хотя и с некоторым смещением по времени, а средняя эффективность сохраняется на уровне около 50.

В рассматриваемых случаях специализация не наблюдается: оба агента продолжают вести себя схожим образом на протяжении всего эксперимента. Однако стабилизация системы для данной задачи может наблюдаться при параметре  $\gamma = 0.9$ , что в какой-то момент приводит к прекращению колебаний и выходу работы системы в устойчивое состояние, в котором у агентов различная скорость сбора двух типов ресурсов, причем их сумма сохраняется (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/9.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/10.jpg>). Таким образом, наблюдается специализация агентов (хотя и неполная, то есть они продолжают переключаться на общие подзадачи).

Введение иерархии в систему управления позволяет добиться быстрой стабилизации работы системы (рис. 4, 5), однако при этом специализация наблюдается лишь кратковременно, пока количество ресурсов на базе не выровнялось. Можно предположить, что основной причиной является то, что агенты продолжительное время учатся решать подзадачи, а к моменту, когда начинают успешно их выполнять, практически одинаково хорошо владеют

обоими навыками. Система остается гомогенной, и оптимальным режимом работы является эффективное выполнение подзадач обоими агентами по мере надобности.

Чтобы на данной задаче пронаблюдать эффект специализации, можно искусственно добавить период в начале работы системы, когда каждый агент может обучаться лишь одной из подзадач (далее это называется гандикапом). В данном случае первый агент мог обучаться некоторое время лишь сбору ресурса В, а второй – ресурса А. Тогда оптимальным режимом работы системы является сбор каждым агентом ресурса, который тот лучше всего научился собирать. От агентов требуется обнаружить этот режим работы и следовать ему. Более всего данный эффект проявляется (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/11.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/12.jpg>) при низких значениях параметра  $\gamma$  у алгоритмов обучения навыкам, например 0.1. В приведенных экспериментах гандикап длился 50 000 тактов (50 эпизодов).

Стоит отметить, что разделение на роли происходит в такой постановке задачи в начале стабилизации количества ресурсов на базе и сохраняется длительное время после. Через какое-то время система снова становится гомогенной, поскольку в используемых алгоритмах коэффициент  $\epsilon$ , отвечающий за случайное поведение, не уменьшается со временем и случайный выбор действий вопреки обнаруженной эффективной стратегии приводит к тому, что оба агента обучаются обоим навыкам в совершенстве и оптимальный режим работы группы агентов снова становится таким, когда оба выполняют обе подзадачи по мере необходимости. Указанное распределение на роли систематически возникает в ряде экспериментов (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/17.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/18.jpg>), хотя и несколько смещено по моменту возникновения.

Отдельно можно отметить иногда возникающую специализацию в постановке задачи без гандикапа (на рисунке 6 это период с 50-го по 60-й эпизоды эксперимента, а также кратковременные меняющиеся периоды специализации в следующих эпизодах).

### Обсуждение результатов

Значение  $\gamma$  в алгоритмах навыков для наблюдения специализации было выбрано низкое (0.05), что в некотором смысле делает за-

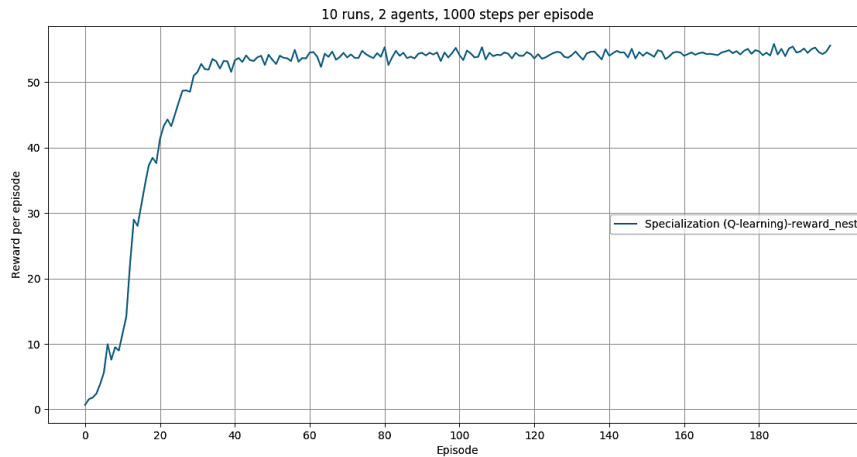


Рис. 4. Эффективность выполнения задачи группой агентов с иерархией алгоритмов Q-обучения для  $\gamma = 0.9$ , усредненная по экспериментам

Fig. 4. The problem solution efficiency by a group of agents with a Q-learning algorithm hierarchy for  $\gamma = 0.9$ , averaged over experiments

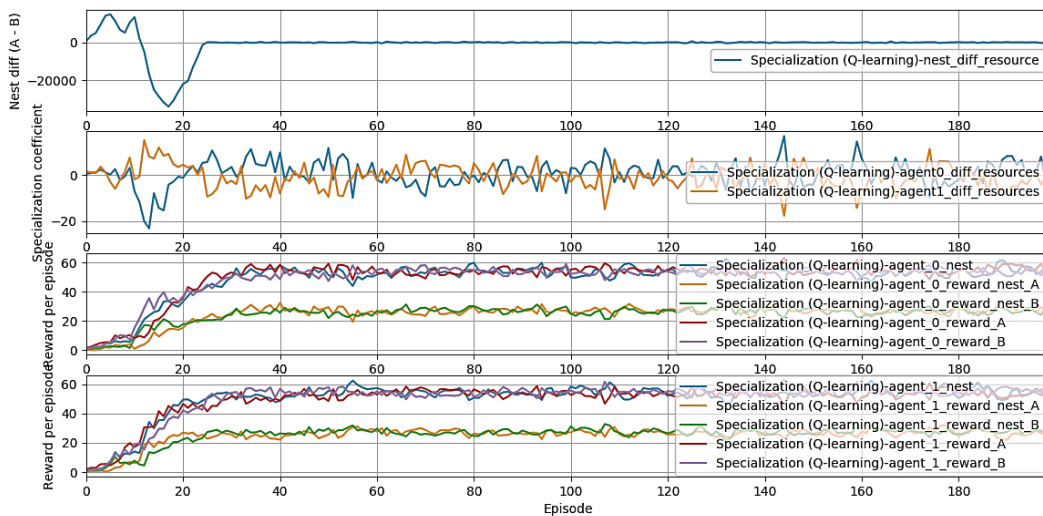


Рис. 5. Динамика сбора ресурсов и навыков агентов с иерархией алгоритмов Q-обучения для  $\gamma = 0.9$ , усредненная по экспериментам

Fig. 5. The dynamics of resource collection and agent skills with a Q-learning algorithm hierarchy for  $\gamma = 0.9$ , averaged over experiments

дачу приобретения навыка более сложной (то есть достижения стратегии, близкой к оптимальной). Это несколько компенсирует проблему, когда в выбранной для рассмотрения задаче агенты могут весьма быстро обучиться обоим навыкам и специализация перестанет иметь смысл с точки зрения оптимизации решаемой группой агентов задачи.

Работа была направлена на исследование гипотезы о возможности возникновения эффекта специализации в групповых системах из гомогенных агентов, способных к обучению,

а также о полезности данного эффекта для повышения эффективности работы системы (то есть достижения цели группы).

Несмотря на постановку задачи, выбранную таким образом, чтобы специализация агентов имела смысл и проявлялась в отрыве от других эффектов, но при этом сохраняла особенности работы реальных групп роботов (мобильность, работа в пространстве, неполное описание текущего состояния, доступное агенту, и т.п.), дальнейший анализ показал, что специализация агентов в данной задаче может наблю-

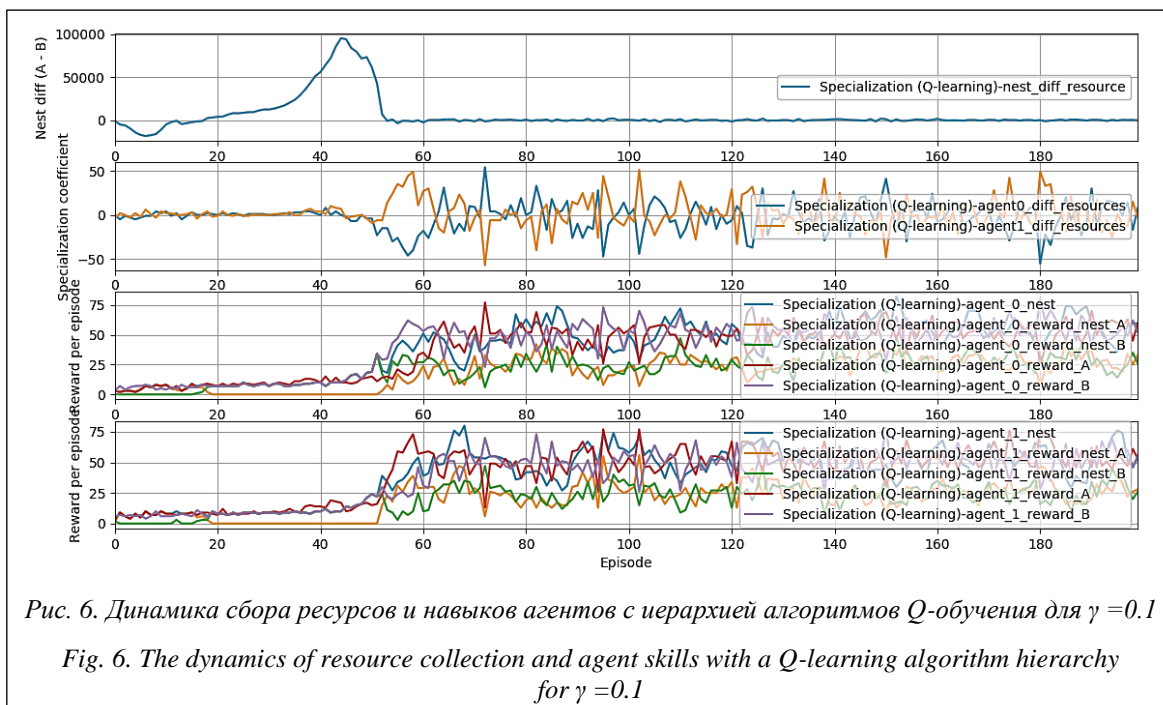


Рис. 6. Динамика сбора ресурсов и навыков агентов с иерархией алгоритмов Q-обучения для  $\gamma = 0.1$

Fig. 6. The dynamics of resource collection and agent skills with a Q-learning algorithm hierarchy for  $\gamma = 0.1$

даться лишь временно при возникновении временного, но большого преимущества, позволяющего агентам обучиться разным навыкам, а асимптотическое и более эффективное поведение группы заключается в состоянии, когда оба агента способны одинаково хорошо (и оптимально) выполнять каждую подзадачу (связанную с навыком). Из этого можно сделать вывод, что эффект специализации может иметь большую важность, когда агентам тяжело (долго или по каким-то причинам нежелательно) обучаться нескольким или даже всем навыкам сразу, а также существуют предпосылки для того, чтобы агент, выбрав навык или их подмножество, значительно продвинулся в их изучении перед получением возможности переключиться на другой. Последнее может обеспечиваться либо напрямую алгоритмом обучения (использованные в данной статье, к примеру, для этого не подходят, поскольку склонны к относительно частому переключению действий), либо спецификой рассматриваемой задачи, к примеру, если выбранное агентом первое действие вынуждает его выполнить ассоциированную с ней подзадачу перед тем, как он вернется в исходное состояние.

В процессе исследования поставленной проблемы и соответствующих алгоритмов были выявлены некоторые другие эффекты, а также трудности и возможные подходы к их решению, в частности: нестабильная эффективность работы группы обучающихся агентов,

стабилизирующее влияние иерархического управления, слишком быстрое обучение всем навыкам в задаче, приводящее к гомогенизации группы.

Эффективность выполнения целевой задачи группой обучающихся агентов наблюдалась в экспериментах (рис. 2 и 3) из-за необходимости переобучаться в силу нестационарности задачи, обусловленной требованием сбора разных ресурсов, частичным знанием состояния среды и влиянием агентов на эффективность работы друг друга. Возникающие эффекты специализации и иерархический алгоритм стабилизируют систему. В случае с иерархической системой, в которой агенты имели возможность научиться решать подзадачи сбора обоих ресурсов, случайность принятия решений в итоге приводит к идеально решающим подзадачи агентам, что убирает выгодность специализации и приводит к эффективно решающей задачу гомогенной группе.

### Заключение

В статье была предложена и рассмотрена постановка задачи фуражировки с несколькими ресурсами для группы агентов, требующая выполнения различных подзадач. Исследована иерархическая система управления, основанная на мета-алгоритме, выбирающем подцель для решения, и нескольких алгоритмах нижнего уровня, обучающихся решать конкретную под-

задачу. Наблюдались эффекты нестабильной работы системы, в которой эффективность решения задачи имела сильные колебания. Эффект специализации, проявляющийся в системе для определенных параметров при классическом алгоритме Q-обучения и для иерархической системы управления из нескольких таких алгоритмов, приводил к стабилизации системы. Анализ результатов показывает также, что выбранная

задача не очень хорошо демонстрирует преимущества специализации по ряду причин, включая простоту обучения подзадачам агентов и наличие оптимального поведения группы, когда все агенты работают по одной и той же логике и фактически группа становится гомогенной. Эффект, возможно, имеет большее значение для более сложных задач, что является предметом дальнейших исследований.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-29-04412 офи\_м.*

### **Литература**

1. Lopes Silva M.A., Ricardo de Souza S., Souza M.J.F., Felizardo de França Filho M. Hybrid metaheuristics and multi-agent systems for solving optimization problems: A review of frameworks and a comparative analysis. *Appl. Soft Comput. J.*, 2018, vol. 71, pp. 433–459.
2. Демин А.В., Витяев Е.Е. Логическая модель адаптивной системы управления // *Нейроинформатика*. 2008. Т. 3. № 1. С. 79–107.
3. Vorobev V., Rovbo M. Analysis of semantic probabilistic inference control method in multiagent foraging task. *Proc. Conf. OSTIS, Minsk*, 2019, pp. 237–242.
4. Ровбо М.А., Сорокоумов П.С. Архитектура системы управления интеллектуальным агентом на основе семиотической сети // *Открытое образование*. 2018. Т. 22. № 5. С. 84–93.
5. Kiselev G.A., Panov A.I. Sign-based approach to the task of role distribution in the coalition of cognitive agents. *Proc. SPIRAS*, 2018, vol. 2, no. 57, pp. 161–187.
6. Kulkarni T.D., Saeedi A., Narasimhan K.R., Tenenbaum J.B. Hierarchical deep reinforcement learning: integrating temporal abstraction and intrinsic motivation. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.06057> (дата обращения: 10.11.2019).
7. Singh D., Sardina S., Padgham L., James G. Integrating learning into a BDI agent for environments with changing dynamics. *Proc. IJCAI.*, 2011, vol. 3, pp. 2525–2530.
8. Sutton R.S., Barto A.G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge. MIT Press, 2018, 552 p.
9. Brown A., Petrik M. Interpretable reinforcement learning with ensemble methods. 2018. URL: [arxiv.org/pdf/1809.06995](http://arxiv.org/pdf/1809.06995) (дата обращения: 10.11.2019).
10. Ровбо М.А. Распределение ролей в гетерогенном муравьино-подобном коллективе // *КИИ-2016: сб. матер. конф.* Смоленск, 2016. Т. 2. С. 363–371.
11. Guo H., Meng Y. Distributed reinforcement learning for coordinate multi-robot foraging. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, 2010, vol. 60, no. 3–4, pp. 531–551.

## **The specialization problem in hierarchical learning control systems for the foraging problem**

*E.E. Ovsyannikova*<sup>1</sup>, *Research Engineer, eeovsyan@gmail.com*  
*M.A. Rovbo*<sup>1</sup>, *Research Engineer, rovboma@gmail.com*

<sup>1</sup>*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182, Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers the specialization problem in a multi-agent system that consists of identical agents capable of learning that also has weakly connected sub-goals in the problem.

The authors propose and consider a hierarchical control system, which is based on  $\epsilon$ -greedy Q-learning, with learning on the foraging problem with different types of resources. A group of initially identical agents face the problem of collecting several types of environmental resources and bringing them to a base. The resources must be collected in a certain proportion and the reward is only for transporting the missing resource to the base.

The proposed control system has several levels. The upper level is responsible for choosing the resource type that the agent is going to bring to the base. The lower one selects the learning algorithms and determines the skill of collecting a certain type of resource. Thus, in such multi-agent system, the hierarchy in control allows initially identical agents to form different skills of collecting resources during their work.

The hypothesis under consideration is that, despite the problem does not have prerequisites for optimization through specialization (ideally working agents could collect different resources alternately), the difference in experience gained during operation can make more efficient specialization of the different agents on different resources. The results were obtained using a computational experiment on a computer model. The effect of specialization was observed under certain conditions. Also, specialization and the introduction of a hierarchy in the control system have notably stabilized the performance efficiency of the multi-agent system.

**Keywords:** reinforcement learning, multi-agent system, robotics, foraging, specialization.

*Acknowledgements.* The work was partially supported by RFBR, grant no. 16-29-04412 офу\_м.

### References

1. Lopes Silva M.A., Ricardo de Souza S., Souza M.J.F., Felizardo de França Filho M. Hybrid metaheuristics and multi-agent systems for solving optimization problems: A review of frameworks and a comparative analysis. *Appl. Soft Comput. J.*, 2018, vol. 71, pp. 433–459.
2. Demin A.V., Vityaev E.E. Logical model of the adaptive control system. *Neuroinformatics*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 79–107 (in Russ.).
3. Vorobev V., Rovbo M. Analysis of semantic probabilistic inference control method in multiagent foraging task. *Proc. Conf. OSTIS*, Minsk, 2019, pp. 237–242.
4. Rovbo M.A., Sorokoumov P.S. Control system architecture of an intelligent agent based on a semiotic network. *Open Education*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 84–93 (in Russ.).
5. Kiselev G.A., Panov A.I. Sign-based approach to the task of role distribution in the coalition of cognitive agents. *Proc. SPIIRAS*, 2018, vol. 2, no. 57, pp. 161–187.
6. Kulkarni T.D., Saeedi A., Narasimhan K.R., Tenenbaum J.B. *Hierarchical Deep Reinforcement Learning: Integrating Temporal Abstraction and Intrinsic Motivation*. 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.06057> (accessed November 10, 2019).
7. Singh D., Sardina S., Padgham L., James G. Integrating learning into a BDI agent for environments with changing dynamics. *Proc. IJCAI*, 2011, vol. 3, pp. 2525–2530.
8. Sutton R.S., Barto A.G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, MIT Press, 2018, 552 p.
9. Brown A., Petrik M. *Interpretable Reinforcement Learning with Ensemble Methods*. 2018. Available at: [arxiv.org/pdf/1809.06995](https://arxiv.org/pdf/1809.06995) (accessed November 10, 2019).
10. Rovbo M.A. Role assignment in a heterogeneous ant-like collective. *Proc. 15th CAI*, Smolensk, 2016, vol. 2, pp. 363–371 (in Russ.).
11. Guo H., Meng Y. Distributed reinforcement learning for coordinate multi-robot foraging. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, 2010, vol. 60, no. 3–4, pp. 531–551.

### Для цитирования

Овсянникова Е.Е., Ровбо М.А. Проблема специализации в иерархических обучающихся системах управления на примере задачи фуражировки // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 195–203. DOI: 10.15827/0236-235X.130.195-203.

### For citation

Ovsyannikova E.E., Rovbo M.A. The specialization problem in hierarchical learning control systems for the foraging problem. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 195–203 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.195-203.

УДК 658.5.011  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.204-209

Дата подачи статьи: 21.10.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 204–209

## **Разработка программного продукта для построения карты создания ценности**

С.А. Гуньков<sup>1</sup>, магистрант, roughest56@gmail.com

С.С. Акимов<sup>1</sup>, старший преподаватель, sergey\_akimov\_work@mail.ru

<sup>1</sup> Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, 460018, Россия

В представленной работе рассматриваются проблемы построения карты потока создания ценности. Определено, что данная карта является элементом бережливого производства и позволяет визуализировать материальные потоки, выделяя те из них, которые добавляют ценность создаваемому продукту. При этом отмечено, что построение подобных карт вручную является сложной и рутинной работой, а относительная простота отображения процессов дает возможность для их алгоритмизации, что составляет предпосылки для разработки программного продукта, реализующего карты потока создания ценности.

В статье сделан обзор существующих программных продуктов, имеющих в своем функционале возможность построения карт потоков создания ценности. Перечислены основные характеристики и функциональные особенности, а также приведена система оценки данных программных продуктов. Определено, что, несмотря на многообразие существующих программных решений, в настоящее время нет программного продукта, реализующего карту потока, с интерфейсом на русском языке. Кроме того, каждый программный продукт достаточно дорогой, что ограничивает его применение. Поэтому было принято решение о разработке собственного программного продукта на базе Аэрокосмического института Оренбургского государственного университета. В результате реализовано новое ПО на русском языке, которое является узкоспециализированным и выполняет все необходимые функции для построения карт потоков.

**Ключевые слова:** карта потока создания ценности, программная реализация.

В условиях жесткой конкуренции, непостоянства мирового рынка и экономической неустойчивости многие предприятия пытаются снизить свои потери за счет современных систем менеджмента. Для поддержания необходимого уровня конкурентоспособности промышленным предприятиям необходимо оптимизировать производственный процесс.

На оптимизацию направлены системы бережливого производства, основу которого составляет эффективное применение взаимосвязанной совокупности специальных инструментов и методов [1]. Для работы данных инструментов и методов необходимо визуализировать процесс создания продукции в виде карты и выделить в нем процессы, создающие ценность [2]. Карта потока создания ценности представляет собой графическое изображение всего процесса производства продукции и позволяет выявить все потери [3].

Современное видение процесса построения карт потока подразумевает реализацию двух их видов: карты текущего состояния и карты будущего состояния [4]. Карта текущего состояния представляет собой производственный

процесс в настоящее время. Карта будущего состояния описывает оптимальный производственный процесс модифицированной карты текущего состояния.

В настоящее время бережливое производство и методы построения карт потока в нашей стране недостаточно развиты, однако примеры их использования все чаще появляются в различных научных и научно-технических работах [5, 6]. Построение карты потока создания ценности в большинстве случаев является ручным рутинным процессом, поэтому достаточно актуальна разработка программных продуктов, которые упростили бы его [7]. Среди уже существующих программных продуктов можно выделить EVSM, iGrafx, Leanview, BreezeTree Software FlowBreeze. Рассмотрим каждую программу более подробно и проведем их оценку по следующим критериям: язык интерфейса, сложность интерфейса, стоимость, доступный функционал, необходимость применения дополнительных средств.

**ПО EVSM** предназначено для представления карты потока создания ценности в электронном виде, а также для анализа и последо-

вательной оптимизации этой карты [7]. EVSM представляет собой надстройку популярной программы Visio.

EVSM имеет развитую систему помощи пользователям, содержащую в себе достаточно подробное описание всего функционала программы.

В программе имеется возможность импорта данных из внешних источников, применимого, например, при автоматизированном взаимодействии с различными MES-системами.

На основе введенных данных EVSM позволяет вычислять различные параметры технологического процесса (например, общие производственные и непроизводственные потери, время такта, время загрузки и т.п.). Немаловажна для анализа различных вариантов карты будущего состояния ступенчатая диаграмма, позволяющая увидеть соотношение различных параметров на временной шкале.

Карта будущего состояния строится на основе VSM текущего состояния и представляет собой описание оптимального распределения производственных и информационных потоков. Целями составления карты будущего состояния являются обнаружение источников потерь (проблем в производственном процессе) и устранение их путем перехода к будущему состоянию производственного процесса, который можно осуществить за очень короткий период времени [8].

Вышепредложенное описание программы EVSM помогает оценить ее по введенным критериям:

- язык интерфейса – английский;
- сложность интерфейса – имеет сложную структуру, но обладает системой помощи с видеороликами и большим количеством примеров использования данной программы;
- стоимость – \$595;
- доступный функционал – EVSM предназначена только для построения карты потока создания материальных ценностей и проведения расчетов по этой карте, а также предоставляет возможность импорта данных из внешних источников (например, БД Excel, Access, OLEDB, SQL Server и т.д.);
- необходимость применения дополнительных средств – отсутствует.

**ПО iGrafx** представляет решения по процессному управлению, расширяющие возможности людей в разных организациях, содействуя оптимизации бизнеса и достижению операционного превосходства. ПО iGrafx

эффективно связывает бизнес-цели и ИТ, моделирует всю организацию в единой среде, создавая базу знаний и формируя почву для анализа. Система iGrafx предоставляет наиболее полнофункциональные и одновременно простые в использовании инструменты для организаций любого уровня процессной зрелости, чтобы достичь и обеспечить конкурентоспособность мирового класса [9].

Программные продукты iGrafx BPM дают возможность сотрудникам различных отделов вносить свой вклад в достижение компанией процессного совершенства. Инструменты iGrafx BPM можно использовать отдельно либо может быть создана среда для групповой деятельности, что позволит компании работать более эффективно. Возможности iGrafx BPM для моделирования архитектуры предприятия объединяют процессную, бизнес-архитектуру и архитектуру предприятия на одной платформе для управления и совершенствования бизнес-процессов, включая управление ERP проектами для организаций, использующих SAP. Для поддержки культуры постоянного совершенствования процессов в рамках управления эффективностью деятельности iGrafx BPM предоставляет возможность отслеживать и оценивать результаты ключевых процессов [9].

Независимо от размера, сферы деятельности компании или зрелости ее процессов программные продукты iGrafx BPM позволяют организациям перейти на более высокий уровень процессного совершенства.

Из описания можно оценить программу iGrafx:

- язык интерфейса – английский;
- сложность интерфейса – простые в использовании инструменты для организаций любого уровня процессной зрелости;
- стоимость – примерно \$1570;
- доступный функционал – большой функционал, но построение карты потока создания ценностей не является основной функцией программы;
- необходимость применения дополнительных средств – дополнительное ПО не нужно, но существует множество версий программного продукта с разным набором функционала.

**ПО Leanview** – полностью интегрированное решение для проектирования процессов бережливого производства. Разработано с целью помочь компаниям всех типов и размеров без лишних затрат при проектировании, оценке



и внедрении бережливых процессов. Помогает повысить операционную и финансовую эффективность [10].

По критериям программа Leanview описывается следующим образом:

- язык интерфейса – английский;
- сложность интерфейса – простая структура интерфейса;
- стоимость – примерно \$596;
- доступный функционал – позволяет проектировать множество процессов бережливого производства; построение карты потока создания ценности не является основной функцией, при этом программа производит необходимые расчеты;
- необходимость применения дополнительных средств – отсутствует.

**ПО BreezeTree Software FlowBreeze** представляет собой модуль, устанавливаемый на программу Microsoft Excel. Благодаря ему открывается возможность работы с блок-схемами в таблицах Excel.

Модуль создан не только для программистов, занимающихся разработкой алгоритмических схем, но и для любых пользователей, которым необходимо просто нарисовать схему в Excel. Поэтому в состав возможных форм входят не только стандартные блоки для обучения, но и большое количество дополнительных.

Связь блоков между собой происходит с помощью отдельного меню с большим функционалом. Можно выбрать не только объекты, между которыми устанавливается связь, но и ее направление, вид и размер. При необходимости пользователь может добавить различные VSM-символы, которых во FlowBreeze около сорока [10].

На основе представленного описания программу BreezeTree Software FlowBreeze можно рассмотреть по критериям следующим образом:

- язык использования – английский;
- сложность интерфейса – имеет простой интерфейс, а также обладает инструкцией от разработчика; служба поддержки пользователей;
- стоимость – примерно \$249;
- доступный функционал – множество функций для создания блок-схем позволяет осуществить построение, однако расчеты не автоматизированы;

– необходимость применения дополнительных средств – для работы необходим Excel, так как является его надстройкой.

Проведенный анализ существующих программных продуктов показал наличие у многих из них ряда проблем и недостатков. В частности, все перечисленные программные продукты представлены только на английском языке. Кроме того, каждый программный продукт достаточно дорогой, что ограничивает его применение. Поэтому было принято решение о разработке собственного программного продукта на базе Аэрокосмического института Оренбургского государственного университета.

В качестве среды программирования выбрана BorlandDelphi 7. Среда Delphi – одна из наиболее перспективных сред программирования, получившая достаточно широкое распространение.

Реализованная программа дает возможность пользователю без особых трудностей построить карту потока создания ценности для промышленного предприятия. В главной форме программы размещаются графические объекты, характеризующие процесс обработки промышленных изделий, – станки, машины и другое промышленное оборудование. Взаимодействие может осуществляться не только с объектами, непосредственно принадлежащими анализируемому предприятию, но и с различными внешними объектами – другими организациями, предприятиями, цехами и структурами.

После ввода данных необходимо связать операции линиями материальных потоков предприятия. Для реализации данной функции следует нажать на кнопку «Связи» и выбрать конкретную операцию, из которой будет выходить материальный поток (рис. 1).

Чтобы привести поток ценности в нужное место, необходимо выбрать ключевую опера-

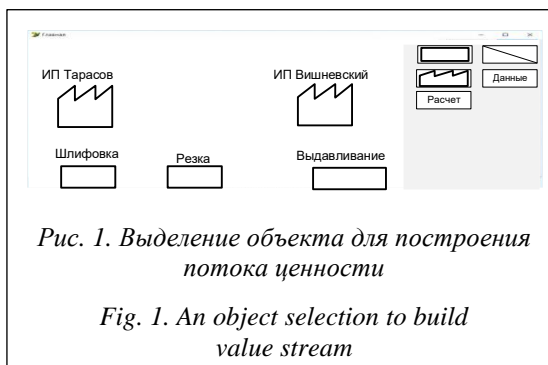


Рис. 1. Выделение объекта для построения потока ценности

Fig. 1. An object selection to build value stream



цию, в которую будет заходить данный материальный поток.

По результатам описанных выше манипуляций между операциями будет проложен материальный поток, характеризующий движение ценности от одной операции к другой (рис. 2).

После построения всех материальных потоков необходимо нажать кнопку «Расчет». Появится форма расчетов показателей эффективности карты потока (рис. 3).

В процессе оценки эффективности потока создания ценности необходимо анализировать все операции, для чего и вводятся показатели эффективности. Программа в автоматизированном режиме оценивает эффективность каждой операции, и те процессы и потоки, эффективность которых ниже среднего значения по предприятию, выделяются на карте потока ценности красным цветом (рис. 4).

Таким образом, программа позволяет выполнить следующие основные операции:

- отображение операций, процессов, потоков для наглядного представления производства предприятия;
- ввод данных для анализа степени эффективности тех или иных операций и процессов;
- оценка степени эффективности операций и процессов в автоматизированном режиме;
- выделение на карте потока ценности наименее эффективных операций и процессов.

Выполняется оценка данного программного продукта по уже применяемой ранее схеме:

- язык интерфейса – русский;
- сложность интерфейса – простая структура интерфейса;
- стоимость – примерно \$100;
- доступный функционал – позволяет проектировать множество процессов бережливого производства; построение карты потока создания ценности является основной функцией; все расчеты автоматизированы;
- необходимость применения дополнительных средств – необходима предварительная установка BorlandDelphi 7.

Таким образом, программа позволяет строить карту потока создания ценности на промышленном предприятии. Она может служить

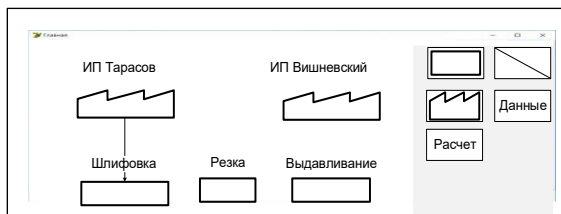


Рис. 2. Отображение потока ценности

Fig. 2. The value stream displaying

|            | Ip | Im | It | Io | Ic | Kt          |
|------------|----|----|----|----|----|-------------|
| Выдавливан | 10 | 10 | 25 | 20 | 35 | 0.571428571 |
| Шлифовани  | 15 | 15 | 35 | 30 | 50 | 0.6         |
| Сборка     | 15 | 15 | 40 | 30 | 55 | 0.545454545 |

Эффективность работы всей системы Kt=0,545454545454545  
 Не эффективные процессы: Выдавливание Шлифование

Рис. 3. Форма расчетов

Fig. 3. The settlement form

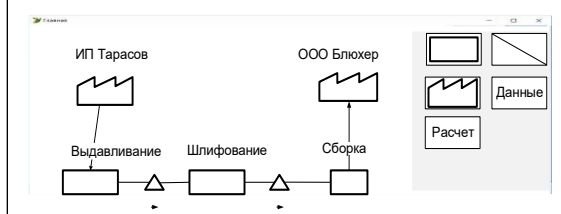


Рис. 4. Форма отображения неэффективных операций на карте потока

Fig. 4. Form for displaying inefficient operations on the flow map

универсальным инструментом для оценки производственных потерь исходя из определенных условий работы предприятия, что даст возможность значительно уменьшить материальные затраты путем оптимизации работы, улучшить промышленное производство и тем самым способствовать повышению его экономического потенциала.

### Литература

1. Акимов С.С., Трипкош В.А. Производственные процессы в карте потока создания ценностей // Актуальные проблемы экономической деятельности и образования в современных условиях: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. 2018. С. 235–239.

2. Гуньков С.А., Акимов С.С. Построение карты потока создания ценностей в системе бережливого производства предприятия // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч. конф. Оренбург, 2018. С. 654–657.
3. Панина Ф.Ю., Федоськина Л.А. Построение карты потока создания ценности в системе бережливого производства: практический подход. URL: [http://www.up-pro.ru/library/production\\_management/lean/karta-potoka-cennosti.html](http://www.up-pro.ru/library/production_management/lean/karta-potoka-cennosti.html) (дата обращения: 15.10.2019).
4. Baudin M. Where do «Value Stream Maps» come from? URL: <http://michelbaudin.com/2013/10/25/where-do-value-stream-maps-come-from/> (дата обращения: 15.10.2019).
5. Бахтимов А.А., Шахматова Ю.С. Оценка финансовой устойчивости предприятия в концепции бережливого производства // Экономика и управление: проблемы, решения. 2017. Т. 1. № 9 С. 79–84.
6. Бельш К.В., Давыдова Н.С. Алгоритм составления карты потока создания ценности на промышленном предприятии // Вестн. Удмурт. ун-та: Экономика и право. 2015. № 2-1. С. 7–13.
7. Тарасов В.Н., Ушакова М.В., Ушаков Ю.А. Анализ и оптимизация карты потока создания ценностей с помощью программной системы EVSM // Вестн. СамГТУ. 2012. № 2. С. 82–89.
8. Ballé M., Ballé F. The Lean Manager: A Novel of Lean Transformation. Cambridge, Lean Enterprise Inst. Publ., 2009, 459 p.
9. ROI-Proven Business Transformation. URL: [igrafx.com](http://igrafx.com) (дата обращения: 15.10.2019).
10. Программы для построения карт потоков создания ценности. URL: <http://wkazarin.ru/2009/09/10/software-for-vsm/> (дата обращения: 15.10.2019).

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.204-209

Received 21.10.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 204–209

### A software product development for building a value stream map

S.A. Gunkov<sup>1</sup>, Graduate Student, [roughest56@gmail.com](mailto:roughest56@gmail.com)  
S.S. Akimov<sup>1</sup>, Senior Lecturer, [sergey\\_akimov\\_work@mail.ru](mailto:sergey_akimov_work@mail.ru)

<sup>1</sup> Orenburg State University, Orenburg, 460018, Russian Federation

**Abstract.** The paper discusses the construction problems for a value stream flow map. The authors determined that this card is an element of “lean manufacturing” and allows us to visualize material flows, highlighting those that add value to the created product. The authors noted that the manual construction of such cards is a complex and routine work, and the relative simplicity of the process mapping makes it possible to algorithmize them, which is the prerequisite for developing a software product that implements value stream maps.

The paper provides an existing software product overview. These products have in their functionality the ability to build value stream flowcharts. There are the main characteristics and functional features, as well as a system for evaluating the data of software products. The authors determined that despite the variety of existing software solutions, currently there is no software product that implements a flow map with an interface in Russian. In addition, each software product is quite expensive, which limits its use. Therefore, The authors decided to develop their own software product on the basis of the Aerospace Institute of Orenburg State University. As a result, there was new software, made in Russian, which is highly specialized and performs all the necessary functions for constructing flow maps.

**Keywords:** value stream map, software implementation.

### References

1. Akimov S.S., Tripkosh V.A. Production processes in the map of the stream of creating value. *Proc. 13th Intern. Sci. Conf.*, 2018, pp. 235–239 (in Russ.).
2. Gunkov S.A., Akimov S.S. Building a map of the stream of creating value in the lean enterprise system. *Proc. All-Rus. Sci. Conf.*, Orenburg, 2018, pp. 654–657 (in Russ.).
3. Panina F.Yu., Fedoskina L.A. *Mapping the Flow of Value Creation in a Lean Production System: A Practical Approach*. Available at: [http://www.up-pro.ru/library/production\\_management/lean/karta-potoka-cennosti.html](http://www.up-pro.ru/library/production_management/lean/karta-potoka-cennosti.html) (accessed October 15, 2019).
4. Baudin M. *Where do «Value Stream Maps» Come From?* Available at: <http://michelbaudin.com/2013/10/25/where-do-value-stream-maps-come-from/> (accessed October 15, 2019).

5. Bakhtimov A.A., Shakhmatova Yu.S. Estimation of financial stability of the enterprise in the concept of lean production: Theoretical aspect. *Ekonomika i Upravlenie: Problemy i Resheniya*. 2017, vol. 1, no. 9, pp. 79–84 (in Russ.).
6. Belysh K.V., Davydova N.S. Mapping value streams in industrial enterprises. *Bull. of Udmurt Univ. Economics and Law*, 2015, no. 2-1, pp. 7–13.
7. Tarasov V.N., Ushakova M.V., Ushakov Yu.A. Analysis and optimization of the value stream flow map using the EVSM. *Bull. SSTU*, 2012, no. 2, pp. 82–89 (in Russ.).
8. Ballé M., Ballé F. *The Lean Manager: A Novel of Lean Transformation*. Cambridge, Lean Enterprise Inst. Publ., 2009, 459 p.
9. *ROI-Proven Business Transformation*. Available at: [igrafx.com](http://igrafx.com) (accessed October 15, 2019).
10. *Programs for Constructing Value Stream Flowcharts*. Available at: <http://wkazarin.ru/2009/09/10/software-for-vsm/> (accessed October 15, 2019).

#### Для цитирования

Гуныков С.А., Акимов С.С. Разработка программного продукта для построения карты создания ценности // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 204–209. DOI: 10.15827/0236-235X.130.204-209.

#### For citation

Gunkov S.A., Akimov S.S. A software product development for building a value stream map. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 204–209 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.204-209.

## ***Trapper: an operating system bootstrapping package for IBM PC compatible computer systems***

Y.I. Klimiankou<sup>1</sup>, Postgraduate Student, klimenkov@bsuir.by

<sup>1</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

The paper presents an overview of the bootstrapping process on the IBM PC-compatible computer systems and proposes an architecture of the operating system bootstrapping package. The proposed package implements a framework for constructing boot images targeted at non-traditional operating systems like microkernel, an exokernel, unikernel, and multikernel. The bootstrapping package consists of three sets of independent boot modules and a Boot Image Builder application, which creates OS boot images. This application integrates and chains boot modules with one another to organize a complete bootloader chain. They are necessary to bring the operating system to a working state. The bootstrapping package architecture reflects the principal stages of the computer system boot process. Each set of boot modules is connected to the particular boot stage and forms a layer that is responsible for performing its own clearly defined set of functions and relies on clearly defined inter-layer interfaces to strictly isolate dependencies on the boot device, firmware and the specifics of the boot-loaded operating system.

The paper presents the implementation of the described architecture for boot image generation designed and implemented for a research multikernel operating system and explains how it boots up.

Additionally, the paper proposes the full separation idea of initialization code out of the operating system kernel and its movement into the independent OS loader module. Following this idea leads to the exclusion of the “dead” initialization-related program code from the OS kernel. In the commodity operating systems, such code runs only once during system boot, however, being the part of the kernel executable binary image, continues to occupy memory until the system shuts down.

**Keywords:** *boot image, loader, operating system, bootstrapping, image builder, IBM PC.*

IBM PC architecture was introduced in the early 80s and has rapidly become a de facto industry standard for a wide range of computer systems [1]. Modern IBM PC compatible computers use CISC processors with IA-32 and x86\_64 instruction set architectures [2]. In this paper, we will mention only IA-32 while assuming them both, because x86\_64 is a superset of IA-32.

IBM PC compatible computers are the example of ultimately complex and tightly integrated systems that consist of three major components: hardware, firmware, and software. Like any complex system, computers are characterized by inertia. Computers cannot perform user-defined work after power on immediately. Instead, they should pass through a comprehensive initialization process to come into a ready-for-use state. During this process, the computer system should properly initialize all its components. Furthermore, they should cooperate to accomplish this task. The main goal of software initialization is a bootstrapping of the operating system kernel.

This paper focuses on the Trapper architecture – the *operating system bootstrapping package* (OSBP) for IBM PC compatible computer systems. The bootstrapping package includes a three-

layer set of independent modules and an application for their chaining during boot image assembling. We refer to this application as the *Boot Image Builder* (BIB).

A requirement to OSBP is to facilitate booting of various operating systems from a wide range of different boot devices and on machines with different types of firmware. Trapper design aims to be flexible and extensible to be able to support other types of boot devices, firmware, and a wide range of operating systems of different architectures with minimal additional investments.

Trapper design has two principal goals. First of all, it targets primarily operating systems with non-traditional architectures, while commonly used alternatives are focusing on operating systems with a monolithic kernel like Linux and Windows. Second, Trapper is a light-weight solution that creates a minimalistic boot image for explicitly specified boot scenario, while widespread solutions like GNU GRUB represent heavy-weight multi-purpose multiboot packages. Nowadays, the most experimental and research operating systems implement either their private booting environments or invest significant efforts into bidirectional adaptation between OS and existing booting solution.

Furthermore, we did not find any publications highlighting such issues. Almost all OS-related papers tend to omit this information. The secondary goal of this paper is to fulfill this gap. Moreover, Trapper supports an idea of complete separation of initialization code from OS kernel, which is especially advantageous for minimalistic OS kernels.

### IBM PC boot process

A common way to initialize a computer system is the following. Immediately after power-up, each computer system processor performs hardware initialization and an optional *built-in self-test* (BIST). During this process, the system places each computer processor into a predefined well-known state. For example, IA-32 processors set registers to a known state, switch the CPU in real-address mode, invalidate the internal caches, *translation lookaside buffers* (TLBs), and the *branch target buffer* (BTB). Next, computer systems with multiple CPU cores on the board (multicore processor or multiple processors) execute protocol of multiple processor initialization. The goal of this protocol is to select one processor (*bootstrap processor* (BSP)) that will continue the boot process.

A computer places the rest of CPUs (*application processors* (APs)) in a halted state. The first instruction that is fetched and executed by BSP, following a hardware reset, is located at a hardwired physical address called a reset vector. For the IA-32 platform, the 16-bytes reset vector lies at the address FFFFFFF0H [3]. The EPROM containing the software-initialization code must be located at this address and performs a jump to the initialization code of computer system firmware that is also usually stored at ROM.

The IBM PC firmware, in its turn, performs several steps to prepare the system for work. The main action is RAM detection and initialization. First, firmware detects the installed RAM type and quantity and performs a simple memory test on it. Then, firmware detects, enumerates, configures, initializes and performs power-on self-test on every bus and almost every hardware device on the system. Firmware stores all information about the hardware configuration of a computer system as well as the memory map and then will pass it to the bootloader. After that, firmware chooses a boot device and reads a loader from it into the memory. Finally, it transfers control to the just read loader.

The main goal of the loader is to bring the entire boot image into the memory. For that purpose, the loader uses some configuration stored in non-

volatile memory. This config contains information about the source and target location of the boot image, as well as its size. Types of the firmware and the used boot device define a loader code because different boot devices require different access methods. At the same time, the loader should be tiny and conform with the boot specification of the firmware.

The bootstrapping module depends on the firmware, and its goals are to bring the computer system into a predefined and firmware independent state and to collect and unify the information about a computer system. This information includes a multiprocessor configuration (number and IDs of CPUs present in the system) and a memory map and then is passed by the bootstrapper to the bootloader. The bootstrapper also switches the IA-32 processor from real into protected mode. The conceptual goal of the bootstrapper module is to encapsulate all firmware related activities and thus to isolate bootloader from firmware. The bootstrapper defines a firmware-independent interface to the bootloader to achieve this.

Finally, the bootloader finishes the operating system boot process. Bootloaders depend on an operating system. Their purpose is to prepare and initialize a kernel. A bootloader not only initializes kernel data structures but also switches a processor into the final mode of functioning (enables virtual memory and sets up descriptor tables), bootstraps application processors of the system, and initializes an initial set of applications. A bootloader terminates its job by passing control to the entry point of the first application that will already run under kernel control and continue the initialization of the OS environment and services.

Figure 1 shows the principal model of the computer system boot process. It demonstrates the main stages of the process and how the OSBP architecture maps them.

Green boxes in Figure 1 represent three layers of the OSBP architecture. They operate in the environment with one or two internal and one external interface. Both loader and bootstrapper are stick to the firmware interface while the bootloader sticks to the specification of the operating system and especially of its kernel. At the same time, a loader, a bootstrapper, and a bootloader are interfacing between each other via internal interfaces. The interface between a bootstrapper and a bootloader makes it possible to separate dependencies, while the interface between a loader and a bootstrapper creates an opportunity to generalize firmware dependencies. Trapper tries to use these opportunities and replicates the principal model

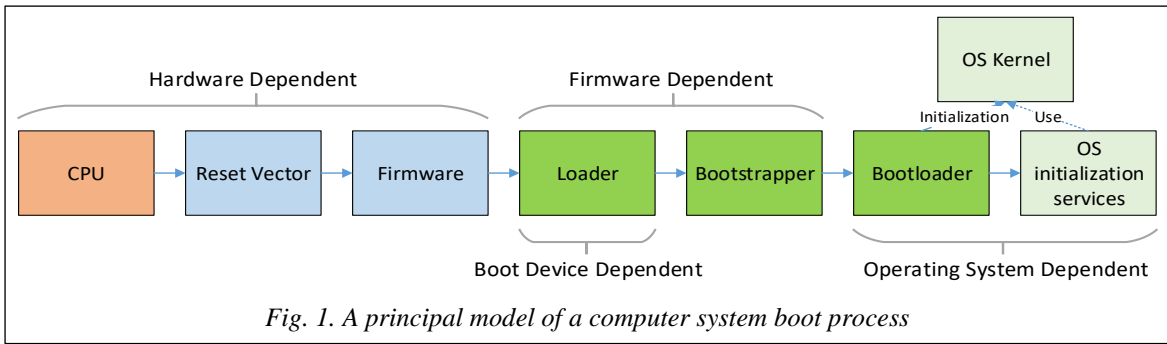


Fig. 1. A principal model of a computer system boot process

structure to create a highly flexible and extensible operating system bootstrapping package.

**Trapper OSBP architecture**

Figure 2 depicts the Trapper OSBP design, which allows flexible and easy construction of boot images for various types of computers and operating systems. The framework consists of a boot image builder application and three buckets of independently designed and implemented boot modules: a bucket of loaders, a bucket of bootstrappers, and a bucket of bootloaders.

Each bucket of boot modules relies on two interfaces: one external and one internal. Internal interfaces are standardized to allow independent

development and implementation of each boot module. Each module, following the layered architecture, relies on one and implements another internal interface. A set of internal interfaces defines the framework of the Trapper OSBP.

The principal purpose of loader modules is to bring the entire boot image from boot medium into the memory. The loader should also have a processor switched from real into a protected mode. Loaders rely on the assumption that a boot image is a single continuous potentially large file both in boot medium and in memory.

Bootstrappers, in their turn, aim to switch a processor into the unified and standardized state, to collect and unify the description of a computer

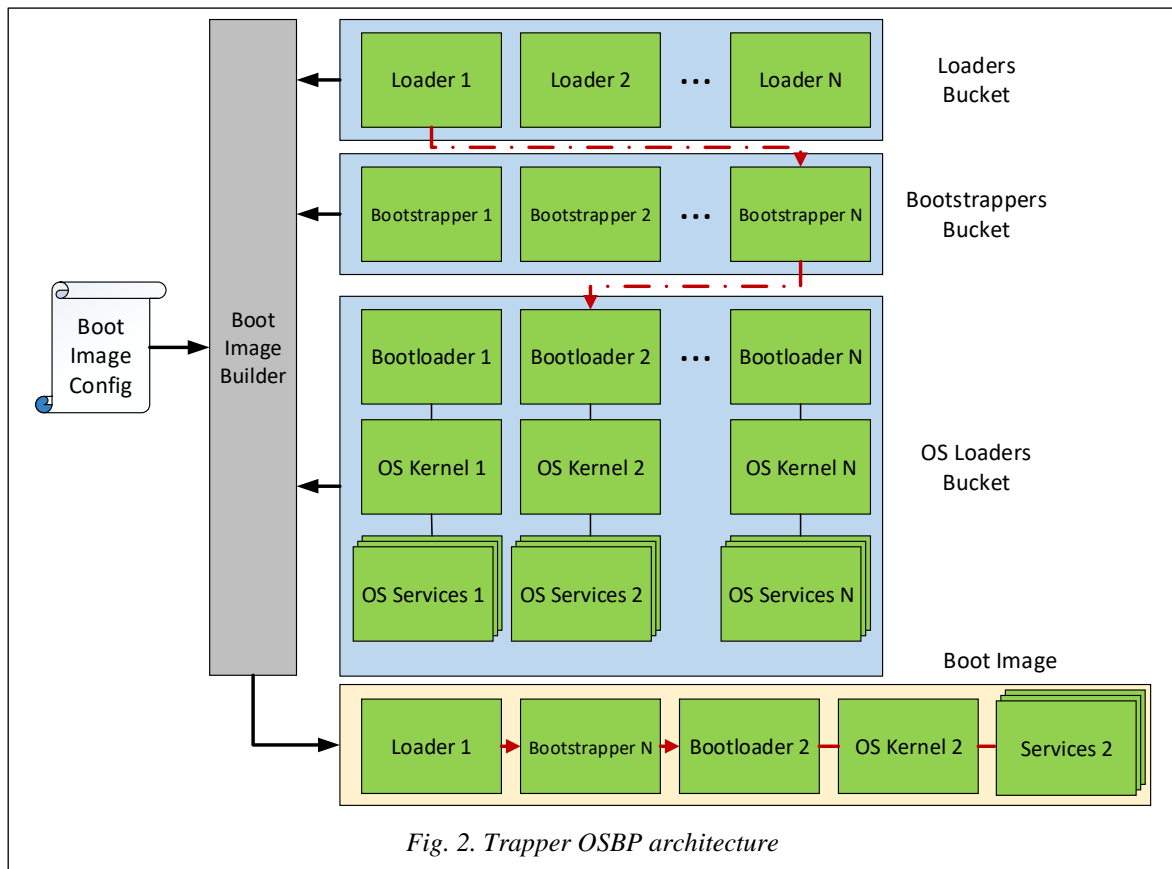


Fig. 2. Trapper OSBP architecture

system configuration. Bootloaders generally require two pieces of information from a bootstrapper. The first one is a memory map that describes the layout of the physical address space. The second one is a multiprocessor table that lists CPUs present in the system.

In contrast to the rest of the modules, Trapper expects that bootloader development is the responsibility of operating system kernel vendors. Bootloader offloads from the kernel all initialization related code. Its purposes are the initialization of the CPU, operating system kernel, and an initial set of OS services. As soon as a bootloader passes control to the first task, the entire boot process finishes, and all memory used by it becomes free.

Boot Image Builder application, as its name implies, is used by system designers to create final boot images and their installation to the specified boot devices. Boot Image Builder uses a configuration file and three buckets of boot modules, as well as a specified target as an input parameter. Guided by a configuration file, it collects required boot modules from buckets and installs them into a boot image, linking modules between each other.

### Loaders

Loaders are the most numerous type of boot modules used in the OSBP. Each loader represents a particular type of boot device used in the environment of specific firmware and is used solely for bringing the entire boot image from the source storage into memory. Due to this fact, such modules are typically tiny (less than a kilobyte) programs written in assembly language.

Loaders are forced to rely on the underlying firmware interface and drivers provided by it to access the required boot medium and to capture a boot image from it. For the same reason, frequently being a part of the boot image, the loader is forced to store the size of the entire boot image, as well as offset to the bootstrapper entry point.

According to the convention declared in the loader/bootstrapper interface, when a loader passes control to the bootstrapper entry point, the boot image is already fully loaded into memory. Thus, neither bootstrapper nor bootloader does not need to access a boot device to fulfill its requirements.

Different firmware affects loader design and implementation in different ways. For example, SFI eliminates the need in the loader, because firmware itself performs all actions expected from the loader [4]. Furthermore, SFI supports only booting from system flash memory. Due to this

fact, there is no variability in the types of boot devices. In its turn, UEFI assumes that the loader is a standalone UEFI application, which is capable of selecting the right boot image file on the file system and read it into memory [5].

The most complicated case is a loader for disk drives on BIOS firmware. First of all, the disk drive oriented loader consists of two separate modules: *Master Boot Record* (MBR) and *Partition Boot Record* (PBR) [6]. Both have a size of 512 bytes. The only purpose of the MBR loader is to choose boot partition and load its PBR into the memory. For that purpose, it uses a partition table that is also a part of MBR (Fig. 3). In its turn, PBR is a conventional loader that holds information about the boot image source location and size and reads it into the memory from the disk drive.

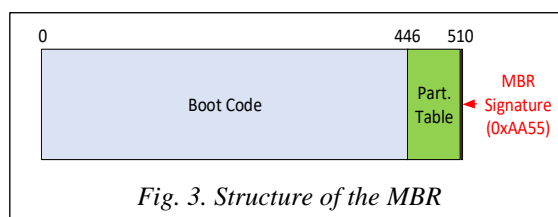


Fig. 3. Structure of the MBR

The PXE loader for BIOS-based computer systems, in turn, also implemented as a separate binary not included in the boot image. It uses PXE API [7] provided on top of BIOS API to download the boot image hosted on the remote TFTP server [8]. The boot image itself is a separate file. By design, PXE-BIOS and HDD-UEFI loaders, in contrast to the HDD-BIOS loader disk sectors-oriented design, follow the same conceptual file-oriented design but use different infrastructures.

### Bootstrappers

The role of bootstrappers is to isolate operating system loaders from firmware. Therefore, all code, required to communicate with firmware, concentrates in bootstrapper modules. The bootstrappers layer relies on the interface provided by the loaders layer, and, in its turn, provides an interface for the bootloader layer. The main functions of the bootstrapper module are:

- memory map gathering,
- gathering of the list of available processors,
- disabling interrupts on the interrupt controller.

However, each implementation uses its firmware to accomplish them.

Currently, there are three well-known firmware interfaces for the IBM PC compatible computer systems: BIOS, UEFI, and SFI (Fig. 4). Therefore,



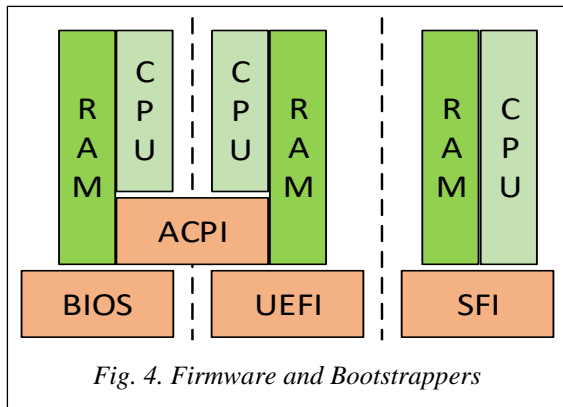


Fig. 4. Firmware and Bootstrappers

there are three bootstrapper modules available in the OSBP.

BIOS is a de facto standard for the IBM PC compatible computer systems. It operates in the 16-bit real mode of CPU and has inherited a lot of legacy features and functions. In fact, BIOS bootstrapper uses only two BIOS functions: *int 0x15-E820* [9] for querying memory map and *int 0x10-0E* for printing error messages on the screen. Bootstrapper captures a list of available processors from ACPI tables [10].

Intel has developed UEFI as a modern and standardized successor of BIOS. In contrast to BIOS, UEFI provides an advanced infrastructure for bootstrappers. It provides an interface for obtaining a memory map, but, like a BIOS, relies on the ACPI for enumeration of available processors.

While UEFI is a complete full-featured BIOS replacement for high-end computer systems (specification consists of 2899 pages) [5], SFI is a simplified BIOS successor and is extremely concise (specification contains ten pages) [4] and convenient for use in embedded systems. It implements an interface in terms of tables for both obtaining a memory map and a list of available processors.

### Bootloader

Nowadays, this layer is filled only by one module for our research multikernel operating system. According to our approach, microkernel and loader are designed and developed in pairs, where bootloader offloads initialization from the kernel. As a result, microkernel does not contain pieces of “dead code” that runs only once during system startup. On the other hand, the bootloader is forced to have detailed knowledge about memory layout used by the kernel, as well as about all its internal data structures.

The bootloader of our multikernel OS (Fig. 5) divides the physical memory of a computer into zones and assigns them to processors. By doing

this, it creates logical domains, each of which will be used by a separate OS node and managed by its kernel. Bootloader installs appropriate components of the boot image into the created domains to complete the OS setup. Finally, the bootloader performs startup application processors and initializes kernel data structures in parallel on all OS nodes.

The bootloader ensures that each processor is in the state expected by the microkernel. As a part of this process, it initializes page tables and enables virtual memory.

As a part of the initialization process, the bootloader setups not only the kernel but also at least one user-mode application. This application or a set of applications initialized by bootloader plays the role of the *Init* process and continues self-deployment of the operating system. Once the bootloader has its work finished, it passes control directly to the *Init* application, bypassing the kernel, but that *Init* application executes already under OS kernel control.

### Boot Image Builder

The Boot Image Builder is a glue that unites all other parts of the framework. Implemented as a command-line tool to facilitate automation, it assembles the boot image from the boot modules captured from the buckets under the guidance of the XML-based configuration file passed to its input.

As mentioned earlier, the main task of the Boot Image Builder is to chain boot modules as well as OS kernels and an initial set of applications into a single image file. Guided by metadata that came with loaders, the Boot Image Builder can separate

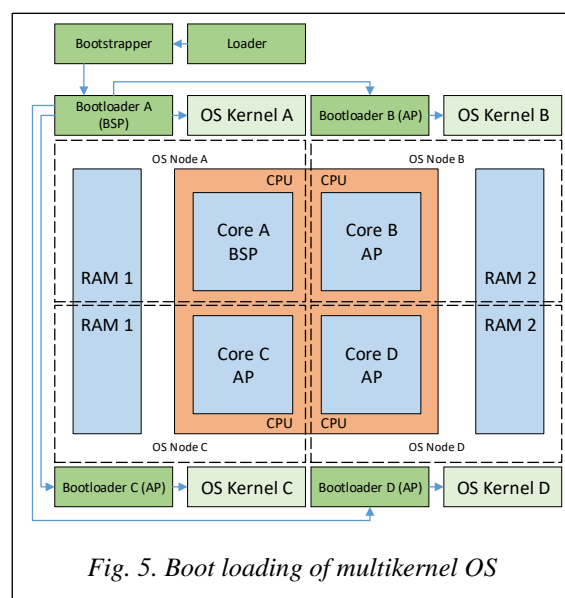


Fig. 5. Boot loading of multikernel OS



loaders from the boot image, which is the case of PXE-BIOS and GPT-HDD loaders. Additionally, it can install the final boot image into the specified disk partition. Finally, the Boot Image Builder has facilities for disk partitioning and supports both partitioning types: MBR and GPT. The MBR loader module is an exceptional component of OSBP.

At the same time, Boot Image Builder can embed a dedicated configuration portion into a boot image for later use by the bootloader. During embedding, it converts this portion of the configuration from XML into a specific binary form.

In our case, we have symmetric multikernel OS for the SMP computer system. Due to this fact, we have one type of kernel and respective bootloader, but that loader is capable of working in two modes: BSP and AP. BSP processor enables the bootloader BSP mode in which it performs deployment of the entire operating system over the application processors. BSP loader copies itself and an appropriate kernel to the memory zones assigned to the application processors to accomplish this job. Then, it starts up the application processors in such a way that instances of bootloader copies run in the AP mode, and thus, skip the OS deployment step. The Boot Image Builder assembles the boot image so that it contains only one instance of each boot module type including kernels and loaders.

Another feature of the Boot Image Builder is that it can parse executable files in PE format. Microkernel and its bootloader are built by the Microsoft C++ compiler as a single section PE executables. First, the Boot Image Builder extracts and puts into the boot image only the code sections of both files. Second, it performs “linkage” between a bootloader and a kernel. The kernel uses table-based dispatching in specific cases. The export table of kernel executable binary stores the addresses of the handler functions. In its turn, the

bootloader imports these addresses through its import table. In the operating system environment, OS makes such “linkage” at run time. In the case of OSBP, the Boot Image Builder performs such linkage during boot image assembling by filling a bootloader import table by actual addresses of the handler-functions of the kernel.

### Conclusion and Outlook

This paper presents the architecture of Trapper – the operating system bootstrapping package developed to facilitate booting of operating systems with alternative architectures. Trapper provides a flexible framework for building boot images targeting IBM PC compatible computer systems based on IA-32 processors. We have demonstrated our design based on three layers of boot modules and have pointed out the importance of interfaces between them for strict separation of dependencies from types of boot devices, firmware, and operating systems. In this context, we have presented an example of implementing OSBP and its components, including loaders, bootstrappers, bootloaders, and the Boot Image Builder application. We have also shown that our architecture provides a flexible environment that can be easily extended to support the additional types of boot devices, firmware, and other operating systems. Moreover, we have demonstrated how our OSBP works in the case of loading the multikernel operating system and how the full separation of initialization code works for our model of co-design and co-development of microkernel and its bootloader. Although our framework was designed and implemented for supporting IBM PC compatible computers based on processors with IA-32 and x86\_64 instruction set architectures, we hope that it can be adopted to support processors with other instruction set architectures.

**Acknowledgements.** *The research and development have been supported by the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The authors would especially like to thank Peter Brancevich, Svyatoslav Kulikov, and Kirill Surkov for their support and assistance.*

### References

1. Mazidi M., Mazidi J. *The 80x86 IBM PC and Compatible Computers: Assembly Language, Design, and Interfacing*. Prentice Hall Publ., 2003, 1024 p.
2. *IA-32 Intel Architecture Software Developer's Manual. Vol. 3: System Programming Guide*. 2002. Available at: <https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2003/readings/intelv3.pdf> (accessed September 15, 2019).
3. Perner J.M., Perner J.A. *Minimal Intel Architecture Boot Loader: Bare Bones Functionality Required for Booting an Intel Architecture Platform*. 2010. Available at: [https://www.cs.cmu.edu/~410/doc/minimal\\_boot.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~410/doc/minimal_boot.pdf) (accessed September 15, 2019).
4. Brown L. The Simple Firmware Interface. *Proc. 2009 Ottawa Linux Symp.*, Montreal, Canada, 2009, pp. 55–60. Available at: <https://www.kernel.org/doc/ols/2009/ols2009-pages-55-60.pdf> (accessed September 15, 2019).

5. Unified EFI Forum, Inc. *Unified Extensible Firmware Interface Specification, Ver. 2.7*. 2017. Available at: [http://www.uefi.org/sites/default/files/resources/UEFI\\_Spec\\_2\\_7.pdf](http://www.uefi.org/sites/default/files/resources/UEFI_Spec_2_7.pdf) (accessed September 15, 2019).
6. Chelliah B., Vidyadharan D.S., Sulekha D., Thomas K.L. *Combating information hiding using forensic methodology*. Proc. 6th Intern. WDFIA, London, UK, 2011, pp. 69–75. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/4a48/520523bc2e3ef9b52163200ae1b1473955d8.pdf> (accessed September 15, 2019).
7. *Preboot Execution Environment (PXE) Specification, Ver. 2.1*. 1999. Available at: <http://www.pix.net/software/pxeboot/archive/pxespec.pdf> (accessed September 15, 2019).
8. Sollins K. *The TFTP Protocol (Revision 2)*. 1992. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc1350> (accessed September 15, 2019).
9. Yao J., Zimmer V.J., Fleming M. *White Paper: A Tour Beyond BIOS Memory Map and Practices in UEFI BIOS*. 2016. Available at: [https://github.com/tianocore-docs/Docs/raw/master/White\\_Papers/A\\_Tour\\_Beyond\\_BIOS\\_Memory\\_Map\\_And\\_Practices\\_in\\_UEFI\\_BIOS\\_V2.pdf](https://github.com/tianocore-docs/Docs/raw/master/White_Papers/A_Tour_Beyond_BIOS_Memory_Map_And_Practices_in_UEFI_BIOS_V2.pdf) (accessed September 15, 2019).
10. *Advanced Configuration and Power Interface Specification, Revision 2.0a*. 2002. Available at: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/articles/acpi-config-power-interface-spec.pdf> (accessed September 15, 2019).
11. *Microsoft Portable Executable and Common Object File Format Specification, Revision 6.0*. 1999. Available at: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse378/03wi/lectures/LinkerFiles/coff.pdf> (accessed September 15, 2019).

УДК 004.451.8

DOI: 10.15827/0236-235X.130.210-217

Дата подачи статьи: 26.09.19

2020. Т. 33. № 2. С. 210–217

### **Тгаррер: программный пакет для создания загрузочных образов, предназначенных для использования в IBM PC-совместимых компьютерных системах**

*Е.И. Клименков*<sup>1</sup>, аспирант, [klimenkov@bsuir.by](mailto:klimenkov@bsuir.by)

<sup>1</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

В статье представлен обзор процесса начальной загрузки IBM PC-совместимых компьютерных систем и предложена архитектура программного пакета предназначенного для создания загрузочных образов, которые необходимы для подготовки и запуска операционной системы, и ориентированного на поддержку загрузки операционных систем с альтернативными архитектурами, такими как микроядерные, экзоядерные и многоядерные ОС.

Данная система представляется в виде трех отдельных наборов независимых загрузочных модулей, дополненных приложением Boot Image Builder, предназначенным для создания загрузочных образов операционной системы путем интеграции загрузочных модулей в единый бинарный образ и связывания их друг с другом для организации целостной цепочки загрузчиков, необходимой для приведения операционной системы в работоспособное состояние. Архитектура предлагаемой программной системы отражает принципиальные этапы процесса загрузки компьютерной системы. Каждый набор загрузочных модулей связан с определенным этапом загрузки и образует слой, решающий свой собственный четко определенный набор задач и опирающийся на четко определенные межслойные интерфейсы для строгой изоляции зависимостей от загрузочного устройства, нижележащего встроенного программного обеспечения и специфики загружаемой операционной системы. В статье представлена реализация предлагаемой архитектуры для генерации загрузочных образов, созданная для исследовательской многоядерной операционной системы, а также объясняется процесс загрузки последней.

Кроме того, предложена идея полного отделения кода инициализации от кода ядра операционной системы и его перемещения в независимый модуль загрузчика ОС. Следование этой идее приводит к исключению мертвого кода, связанного с инициализацией, из ядра ОС. В традиционных операционных системах такой код выполняется единожды при загрузке системы, однако, будучи частью исполняемого двоичного образа ядра, продолжает занимать память на всем протяжении работы компьютерной системы, вплоть до завершения ее работы.

**Ключевые слова:** загрузочный образ, загрузчик, операционная система, IBMPC.

*Исследования и разработки, положенные в основу данной работы, были проведены при поддержке Белорусского Государственного Университета Информатики и Радиоэлектроники. Авторы выражают особую благодарность П. Бранцевичу, С. Куликову и К. Суркову за помощь и поддержку.*

### Литература

1. Mazidi M., Mazidi J. The 80x86 IBM PC and compatible computers: assembly language, design, and interfacing. Prentice Hall Publ., 2003, 1024 p.
2. Intel Corp. IA-32 Intel Architecture Software Developer's Manual. Vol. 3: System Programming Guide. 2002. URL: <https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2003/readings/intelv3.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
3. Pelner J.M., Pelner J.A. Minimal Intel Architecture Boot Loader: Bare Bones Functionality Required for Booting an Intel Architecture Platform. 2010. URL: [https://www.cs.cmu.edu/~410/doc/minimal\\_boot.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~410/doc/minimal_boot.pdf) (дата обращения: 15.09.2019).
4. Brown L. The Simple Firmware Interface. In Proc. of 2009 Ottawa Linux Symposium, Montreal, Canada, 2009, pp. 55-60. URL: <https://www.kernel.org/doc/ols/2009/ols2009-pages-55-60.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
5. Unified EFI Forum, Inc. Unified Extensible Firmware Interface Specification, Ver. 2.7. 2017. URL: [http://www.uefi.org/sites/default/files/resources/UEFI\\_Spec\\_2\\_7.pdf](http://www.uefi.org/sites/default/files/resources/UEFI_Spec_2_7.pdf) (дата обращения: 15.09.2019).
6. Chelliah B., Vidyadharan D.S., Sulekha D., Thomas K.L. Combating information hiding using forensic methodology. Proc. 6th Intern. WDFIA, London, UK, 2011, pp. 69–75. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4a48/520523bc2e3ef9b52163200ae1b1473955d8.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
7. Intel Corp. Preboot Execution Environment (PXE) Specification, Ver. 2.1. 1999. URL: <http://www.pix.net/software/pxeboot/archive/pxespec.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
8. Sollins K. The TFTP protocol, revision 2. 1992. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1350> (дата обращения: 15.09.2019).
9. Yao J., Zimmer V.J., Fleming M. White Paper: A Tour Beyond BIOS Memory Map and Practices in UEFI BIOS. 2016. URL: [https://github.com/tianocore-docs/Docs/raw/master/White\\_Papers/A\\_Tour\\_Beyond\\_BIOS\\_Memory\\_Map\\_And\\_Practices\\_in\\_UEFI\\_BIOS\\_V2.pdf](https://github.com/tianocore-docs/Docs/raw/master/White_Papers/A_Tour_Beyond_BIOS_Memory_Map_And_Practices_in_UEFI_BIOS_V2.pdf) (дата обращения: 15.09.2019).
10. Compaq Computer Corp., Intel Corp., Microsoft Corp., Phoenix Technologies Ltd., Toshiba Corp. Advanced Configuration and Power Interface specification, revision 2.0a. 2002. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/articles/acpi-config-power-interface-spec.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
11. Microsoft Corp. Microsoft Portable Executable and Common Object File Format Specification, revision 6.0. 1999. URL: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse378/03wi/lectures/LinkerFiles/coff.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).

### Для цитирования

Клименков Е.И. Trapper: программный пакет для создания загрузочных образов, предназначенных для использования в IBM PC-совместимых компьютерных системах // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 210–217. DOI: 10.15827/0236-235X.130.210-217.

### For citation

Klimiankou Y.I. Trapper: an operating system bootstrapping package for IBM PC compatible computer systems. *Software & Systems*. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 210–217 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.210-217.

УДК 004.85+ 004.032.26+004.382.2  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.218-228

Дата подачи статьи: 27.02.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 218–228

## **Применение машинного обучения для прогнозирования времени выполнения суперкомпьютерных заданий**

А.В. Баранов<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,  
*antbar@mail.ru, abaranov@jssc.ru*

Д.С. Николаев<sup>2</sup>, старший научный сотрудник, *dmitry.s.nikolaev@gmail.com*

<sup>1</sup> Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН – филиал ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, 119334, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт «Квант», г. Москва, 125438, Россия

Статья посвящена методам и алгоритмам машинного обучения для прогнозирования времени выполнения суперкомпьютерных заданий. Статистика работы суперкомпьютерных систем коллективного пользования показывает, что фактическое время выполнения большинства заданий существенно расходится со временем, запрошенным пользователем. Это снижает эффективность планирования заданий, поскольку неточная оценка времени выполнения приводит к неоптимальному расписанию запусков заданий.

В статье рассмотрена классификация заданий, в основу которой положено отношение фактического времени выполнения задания к запрошенному. Всего было определено шесть классов заданий, причем отношение фактического времени выполнения к запрошенному для каждого класса на порядок отличается от предыдущего класса. Прогнозирование времени выполнения задания осуществляется на основе данных статистики суперкомпьютерной системы коллективного пользования путем отнесения поступающего в систему задания к одному из классов. В качестве исходных данных была использована представленная в формате SWF статистика суперкомпьютера RIKEN Integrated Cluster of Clusters (RICC). Результаты анализа этих статистических данных позволили выявить значимые для машинного обучения признаки потока заданий, было проведено ранжирование признаков по важности и обнаружены скрытые закономерности, влияющие на точность прогнозирования, в частности, определена взаимная корреляция отобранных признаков.

Для распространенных алгоритмов машинного обучения, таких как логистическая регрессия, дерево решений, k ближайших соседей, линейный дискриминантный анализ, метод опорных векторов, случайный лес, градиентный бустинг, нейронная сеть прямого распространения, были получены оценки вероятности верного прогноза. Наилучшие значения показали алгоритмы дерева решений, случайного леса и нейронные сети прямого распространения.

**Ключевые слова:** высокопроизводительные вычисления, системы управления заданиями, планирование суперкомпьютерных заданий, машинное обучение, прогнозирование времени выполнения задания.

Современные суперкомпьютеры, как правило, функционируют в режиме коллективного пользования. Для производства расчетов пользователь должен сформировать так называемое вычислительное задание, состоящее из расчетной программы, исходных данных и требований к объему (число процессорных ядер или узлов суперкомпьютера, размер оперативной или дисковой памяти и др.) вычислительных ресурсов и времени выполнения задания. Формализованное описание задания называется его паспортом. Система коллективного пользования суперкомпьютером, принимая в виде паспортов входной поток заданий от разных пользователей, формирует из поступивших заданий очередь. Процесс формирования и ведения очереди часто называют планированием заданий,

которое осуществляется специальными программными системами [1], такими как SLURM, PBS, LSF, часто называемыми *системами управления заданиями (СУЗ)* [2–4].

Планировщик СУЗ на основе информации из паспортов заданий формирует расписание их запусков. В соответствии с этим расписанием планировщик СУЗ выдает прогноз времени запуска каждого находящегося в очереди задания, основанный на заказанном (запрошенном) пользователем времени выполнения задания. При превышении заказанного времени задание в большинстве СУЗ снимается с выполнения с вероятной потерей результатов расчетов. Стараясь избежать таких потерь, пользователи часто при формировании задания существенно завышают необходимое для вы-

полнения время. Например, статистика Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН показывает, что пользователи в среднем превышают время выполнения на 86 %. Завышенная оценка требуемого времени выполнения приводит к необходимости реформирования расписания при каждом досрочном завершении задания, при этом возможны как простой досрочно освободившихся ресурсов, так и увеличение времени ожидания в очереди отдельных заданий. Отрицательное влияние такой переоценки показано в исследовании [5], в котором неточное указание пользователями времени выполнения заданий привело к невозможности оптимизации планирования за счет заполнения системы заданиями небольшого размера. При недооценке требуемого времени выполнения задание может быть принудительно завершено СУЗ, что приведет к повторной постановке пользователем этого задания в очередь с последней сохраненной контрольной точки. В любом случае (как при переоценке, так и при недооценке требуемого времени выполнения) происходит снижение эффективности планирования заданий.

Более точное планирование возможно за счет предварительной оценки времени выполнения задания на этапе его постановки в очередь. К настоящему времени существует множество исследований по аналитической обработке накопленной статистики работы суперкомпьютеров с целью выявления различных аномалий, предупреждения сбоев, прогнозирования времени работы и т.д.

В работе [6] представлен метод прогнозирования отказов и сбоев суперкомпьютерной системы на основе структурированных данных мониторинга. Предполагается, что каждому отказу или сбою предшествует критический период времени, в который определенным образом изменяются наблюдаемые системой мониторинга характеристики системы. Модель прогнозирования создается с использованием машинного обучения с учителем, при этом обучение осуществляется на основе данных мониторинга критических и обычных временных периодов. В статье [7] авторы представляют модель машинного обучения, основанную на алгоритме Random forest (случайный лес), который применяется для задач классификации, регрессии и кластеризации. Рассматривается модель классификации для прогнозирования аварийного завершения заданий. В [8] предлагается метод обнаружения аномалий и отклонений в производительности в суперкомпьюте-

рах и облачных системах. Однако в этом исследовании применяются искусственно созданные аномалии, внедренные в статистику работы суперкомпьютера, и следует учитывать, что в реальной ситуации характер аномалий может быть другим. В исследовании [9] для прогнозирования времени выполнения и использования ресурсов ввода-вывода заданий на основе их сценариев запуска применяются несколько алгоритмов машинного обучения (k ближайших соседей, дерево решений, случайный лес). С использованием аналогичных алгоритмов машинного обучения, на основе паспортов заданий и статистики работы системы планирования в статье [10] прогнозируются время выполнения, время ожидания в очереди и использование оперативной памяти заданиями. В работе [11] приведено исследование работы алгоритмов машинного обучения на предмет возможности предупреждения (на раннем этапе исполнения задания) о вероятной невозможности выполнения задания в запрошенное пользователем время.

К настоящему моменту с помощью алгоритмов машинного обучения проведено множество исследований статистики работы суперкомпьютерной системы коллективного пользования на предмет выявления аномалий и прогнозирования различных параметров задания. В настоящей работе исследуется возможность использования статистики работы суперкомпьютера в формате Standard Workload Format (SWF) [12, 13] для классификации заданий по времени выполнения и прогнозирования попадания задания в тот или иной класс по характеристикам задания.

#### **Анализ исходных данных и отбор признаков**

В качестве исходного набора данных использовались 100 тыс. записей из SWF-файла загрузки системы RICC (RIKEN Integrated Cluster of Clusters) [14] за 2010 год (RICC-2010-2.swf) [15]. Эти данные отражают работу суперкомпьютера, состоящего из 1 024 узлов, каждый из которых имеет по два 4-ядерных процессора и по 12 Гб ОЗУ.

В формате SWF каждое задание описывается одной строкой, содержащей в полях такие сведения, как номер задания, время его постановки и ожидания в очереди, запрошенное и реальное время выполнения, количество запрошенных и выделенных процессоров, утилизация процессорного времени, запрошенный и

использованный объем памяти, статус завершения задания, идентификаторы пользователя и группы и другие.

Одной из важных процедур предобработки данных в алгоритмах их анализа является отбор значимых признаков. Его цель заключается в том, чтобы отобразить наиболее существенные признаки для решения рассматриваемой задачи классификации. Отбор признаков позволяет:

- достигнуть лучшего понимания задачи, поскольку человеку легче разобраться с небольшим количеством признаков;
- ускорить работу алгоритмов обучения, анализа и прогнозирования;
- повысить качество прогнозирования за счет устранения шумовых признаков и уменьшения ошибки алгоритма на тестовой выборке.

Отбор значимых признаков может осуществляться как вручную – на основе анализа содержательной постановки задачи, так и автоматически – с помощью универсальных алгоритмов.

Из набора полей строки SWF-формата необходимо выделить признаки, которые будут участвовать в машинном обучении и прогнозировании. Изначально все множество полей из SWF-формата является избыточным, соответственно, необходимо провести выбор наиболее информативных, отличительных и независимых признаков. В первую очередь исключаются признаки, у которых значение среднеквадратического отклонения составляет 0, то есть значение этих признаков является статическим и не изменяется, сюда попадают многочисленные незаполненные поля SWF-файла. На этом этапе были отсеяны такие признаки, как утилизация процессорного времени, использованный объем памяти, номера раздела,

исполняемого приложения и предшествующего задания, время ожидания после завершения предшествующего задания. Далее из набора признаков была исключена информация, недоступная на момент постановки задания в очередь и, соответственно, никак не влияющая на прогноз времени выполнения задания: номер задания, время ожидания в очереди, количество выделенных процессоров и статус завершения задания.

Признак «время постановки задания в очередь» (SubmitTime) в формате времени UNIX был преобразован в формат, указывающий только час поступления задания в очередь. Время суток, в которое задание отправлено на исполнение, может быть полезным при прогнозировании, так как более короткие тестовые задания могут выполняться в начале рабочего дня, более длительные ставиться в очередь ближе к его концу.

На рисунке 1 представлена матрица корреляции следующих признаков: время постановки задания в очередь (SubmitTime), запрошенное (RequestedTime) и фактическое (RunTime) время выполнения задания, число запрошенных процессоров (RequestedCPU), объем запрошенной памяти (RequestedMemory), идентификаторы пользователя (UserID) и группы (GroupID), номер очереди (QueueNum), час постановки задания в очередь (Hour).

Как видно из рисунка 1, фактическое время выполнения (RunTime) в наибольшей степени зависит от запрошенного времени выполнения (RequestedTime), идентификатора пользователя (UserID) и времени суток (Hour).

На рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/14.jpg>) показано отношение запрошенного на выполнение

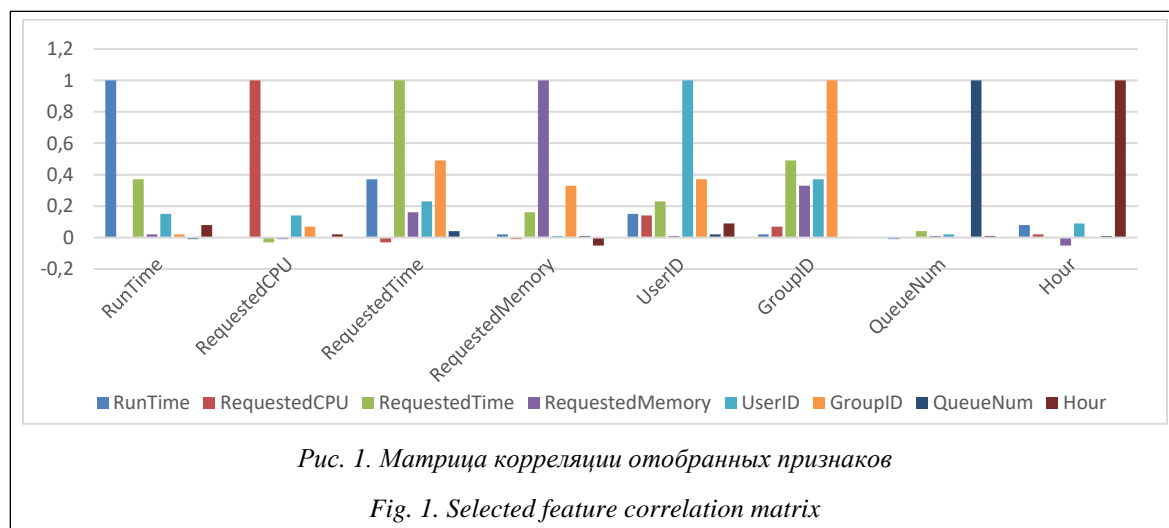


Рис. 1. Матрица корреляции отобранных признаков

Fig. 1. Selected feature correlation matrix

задания времени (RequestedTime) к фактическому (RunTime). Относительно точные запросы времени выполнения на диаграмме располагаются недалеко от диагонали. В данном случае видно, что у подавляющей части заданий запрошенное время выполнения значительно превосходит фактическое, большое число заданий запрашивают максимально возможное время (259,2 тыс. сек.) независимо от фактически требуемого (сплошная линия в верхней части диаграммы). Часть заданий не укладываются в запрошенное время и продолжают работу. Видно, что СУЗ RICC не завершает такие задания принудительно, на диаграмме эти задания расположены ниже диагональной линии.

### Классификация заданий и подготовка признаков к машинному обучению

Определим отношение фактически затраченного времени на выполнение задания к запрошенному времени как

$$Ratio = \frac{RequestedTime}{RunTime}. \quad (1)$$

Добавим это отношение в качестве дополнительного признака к отобранным. Анализ признака показал, что максимальное превышение запрошенного времени составляет 86 400 раз, то есть превышение на 5 порядков. Кроме этого, в выборке [15] присутствуют задания без указания требуемого времени выполнения. Напомним, что, чем меньше разрыв между фактическим временем выполнения задания и запрошенным, тем более эффективной будет работа планировщика СУЗ суперкомпьютера. По этой причине будем классифицировать задания по превышению запрошенного времени по сравнению с фактически затраченным. Нулевой класс образуют задания, у которых отношение (1) менее 1, то есть эти задания не уложились в запрошенное время. В каждом последующем классе заданий отношение фактически затраченного времени на выполнение к запрошенному на порядок увеличивается по сравнению с предыдущим классом. Например, класс 2 образуют задания, фактическое время выполнения которых превышает запрошенное от 10 до 100 раз. Распределение заданий по классам для рассматриваемой выборки [15] приведено на рисунке 2.

Предварительное прогнозирование принадлежности задания к тому или иному классу на этапе его размещения в очереди позволит получить более точное представление о длитель-

ности выполнения задания и тем самым повысить эффективность планирования СУЗ.

Разделим отобранные признаки на числовые и категориальные. К числовым признакам отнесем запрошенное количество процессоров RequestedCPU, время RequestedTime, объем памяти RequestedMemory, а также время суток Hour. К категориальным – идентификаторы пользователя UserID и группы GroupID, номер очереди QueueNum.

Категориальные признаки перед подачей на вход алгоритмов машинного обучения необходимо преобразовать в числовые. Перечисленные категориальные признаки не являются бинарными, поэтому для их преобразования применяется метод векторизации. Признак  $j$ , принимающий  $s$  значений, заменяется на  $s$  признаков, принимающих значения 0 или 1 в зависимости от того, чему равно значение исходного признака  $j$ .

Следует учитывать, что многие алгоритмы машинного обучения чувствительны к масштабированию данных. Поэтому перед построением моделей числовые признаки следует нормировать, так как результаты анализа не должны зависеть от выбора единиц измерения. Если не делать нормировку, то признаки с более мелкой мерой получают больший диапазон значений и, как следствие, большие веса. Для рассматриваемого набора данных применим нормировку:  $x'_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$ , где мини-

мальная и максимальная величины вычисляются автоматически по предоставленным данным.

В результате предварительной обработки исходных данных были получены матрицы размерностью 100 000×214 в случае использования всех имеющихся признаков и размерно-

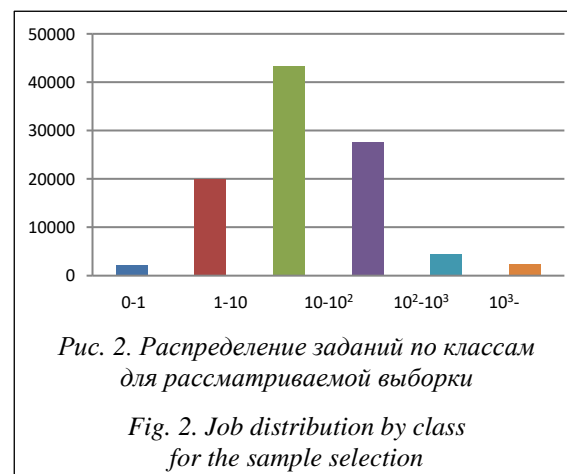


Рис. 2. Распределение заданий по классам для рассматриваемой выборки

Fig. 2. Job distribution by class for the sample selection

стью  $100\ 000 \times 119$  в случае использования трех признаков с наибольшей корреляцией с фактическим временем выполнения задания (RequestedTime, UserID, Hour).

### Прогнозирование с помощью моделей машинного обучения

Для построения моделей была использована программная библиотека Scikit-Learn [16], предоставляющая реализацию целого ряда алгоритмов для обучения с учителем (Supervised Learning) и без учителя (Unsupervised Learning) через интерфейс для языка программирования Python. Библиотека распространяется под лицензией Simplified BSD License и имеет дистрибутивы для множества различных платформ. Библиотека Scikit-Learn ориентирована в первую очередь на моделирование данных.

Построение моделей проводилось на обучающей выборке, а проверка качества построенной модели – на тестовой. После того как модель обучена, появляется возможность прогнозирования значения целевого признака по входным признакам для новых объектов.

Сравним точность прогнозирования следующих алгоритмов машинного обучения:

- логистическая регрессия;
- дерево решений;
- k ближайших соседей;
- линейный дискриминантный анализ;
- машина опорных векторов.

Первая часть алгоритмов относится к так называемым базовым (отдельным). Логистическая регрессия [17] – это способ определения зависимости между переменными, одна из которых категориально зависима, а другие независимы. Для этого применяется логистическая функция (аккумулятивное логистическое распределение). Практическое значение логистической регрессии заключается в том, что она является мощным статистическим методом предсказания значений зависимой переменной на основе значений одной или нескольких независимых переменных. Дерево принятия решений [18] – это метод поддержки принятия решений, основанный на использовании древовидного графа: модели принятия решений, которая учитывает их потенциальные последствия (с расчетом вероятности наступления того или иного события), эффективность, ресурсозатратность. Метрический алгоритм k ближайших соседей [19] служит для автоматической классификации объектов или регрессии. В случае использования метода для клас-

сификации объект присваивается классу, являющемуся наиболее распространенным среди k соседей данного элемента, классы которых уже известны. В случае использования метода для регрессии объекту присваивается среднее значение по k ближайшим к нему объектам, значения которых уже известны. Линейный дискриминантный анализ [20] является обобщением линейного дискриминанта Фишера, метода, используемого в статистике, распознавании образов и машинном обучении для поиска линейной комбинации признаков, которая описывает или разделяет два или более классов или событий. Получившуюся комбинацию можно использовать как в качестве линейного классификатора, так и для снижения размерности перед классификацией. Метод опорных векторов – это набор схожих алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и регрессионного анализа [21]. Принадлежит семейству линейных классификаторов и может также рассматриваться как специальный случай регуляризации по Тихонову. Особым свойством метода опорных векторов является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки классификации и увеличение зазора, поэтому метод также известен как метод классификатора с максимальным зазором. Основная идея метода – перевод исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Две параллельные гиперплоскости строятся по обеим сторонам гиперплоскости, разделяющей классы. Разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, максимизирующая расстояние до двух параллельных гиперплоскостей. Алгоритм работает в предположении, что, чем больше разница или расстояние между этими параллельными гиперплоскостями, тем меньше будет средняя ошибка классификатора.

Вторая часть алгоритмов относится к так называемым ансамблевым. Случайный лес – алгоритм машинного обучения, заключающийся в использовании комитета (ансамбля) решающих деревьев [22]. Алгоритм применяется для задач классификации, регрессии и кластеризации. Основная идея заключается в использовании большого ансамбля решающих деревьев, каждое из которых само по себе дает очень невысокое качество классификации, но за счет их большого количества результат получается хорошим. Градиентный бустинг – это техника машинного обучения для задач класси-



Таблица 1

**Вероятность верного прогноза порядка времени выполнения задания  
для базовых алгоритмов**

Table 1

**The correct forecast probability of job-performance time for basic algorithms**

| Выборка       | Логистическая регрессия | Дерево решений | к ближайших соседей | Линейный дискриминантный анализ | Метод опорных векторов |
|---------------|-------------------------|----------------|---------------------|---------------------------------|------------------------|
| Обучающая № 1 | 0,60                    | 0,84           | 0,81                | 0,58                            | 0,59                   |
| Тестовая № 1  | 0,60                    | 0,83           | 0,81                | 0,59                            | 0,59                   |
| Обучающая № 2 | 0,60                    | 0,83           | 0,79                | 0,58                            | 0,59                   |
| Тестовая № 2  | 0,60                    | 0,82           | 0,79                | 0,58                            | 0,59                   |

фикации и регрессии, которая строит модель предсказания в форме ансамбля слабых предсказывающих моделей, обычно деревьев решений [23]. На каждой итерации вычисляются отклонения предсказаний уже обученного ансамбля на обучающей выборке. Следующая добавленная в ансамбль модель будет предсказывать эти отклонения. Таким образом, добавив предсказания нового дерева к предсказаниям обученного ансамбля, мы можем уменьшить среднее отклонение модели. Новые деревья добавляются в ансамбль до тех пор, пока ошибка уменьшается либо пока не выполнится одно из правил «ранней остановки».

Результаты работы базовых алгоритмов машинного обучения по классификации заданий приведены в таблице 1. Выборка 1 содержит все доступные на момент размещения задания в очередь признаки, выборка 2 содержит только три признака с наибольшей корреляцией – запрошенное время выполнения (RequestedTime), идентификатор пользователя (UserID) и время суток (Hour). Полная размерность выборки 1 составила 100 000×214, выборки 2 – 100 000×119. Выборки были разбиты на обучающие и тестовые в соотношении 70 % и 30 % с рандомизацией.

Как видно из таблицы 1, наибольшую вероятность правильного прогноза порядка времени выполнения задания обеспечивают алгоритмы дерева решений и к ближайших соседей. Точность работы этих алгоритмов повышается при наличии дополнительных признаков.

Результаты работы ансамблевых алгоритмов машинного обучения по классификации заданий приведены в таблице 2.

Ансамблевые алгоритмы показали себя более мощными инструментами по сравнению с базовыми моделями прогнозирования, поскольку:

– сводят к минимуму влияние случайностей, усредняя ошибки каждого базового классификатора;

– уменьшают дисперсию, поскольку несколько разных моделей, исходящих из разных гипотез, имеют больше шансов прийти к правильному результату, чем одна отдельно взятая;

– исключают выход за рамки множества: если агрегированная гипотеза оказывается вне множества базовых гипотез, то на этапе формирования комбинированной гипотезы при помощи того или иного способа множество расширяется так, чтобы гипотеза входила в него.

Таблица 2

**Вероятность верного прогноза порядка  
времени выполнения задания  
для ансамблевых алгоритмов**

Table 2

**The correct forecast probability  
of job-performance time for ensemble algorithms**

| Выборка       | Случайный лес | Градиентный бустинг |
|---------------|---------------|---------------------|
| Обучающая № 1 | 0,83          | 0,78                |
| Тестовая № 1  | 0,83          | 0,78                |
| Обучающая № 2 | 0,82          | 0,78                |
| Тестовая № 2  | 0,82          | 0,78                |

Для ансамблевых алгоритмов было проведено ранжирование признаков по важности, представленное на рисунке 3.

Как видно, в обоих случаях совпадает набор из первых трех признаков, но порядок важности признаков отличается.

**Прогнозирование с помощью нейронных  
сетей прямого распространения**

Нейронные сети прямого распространения, или многослойные перцептроны, являются хо-

рошо известными многоуровневыми классификаторами логистической регрессии [24]. Нейроны в таких сетях расположены слоями и имеют однонаправленные связи между слоями. Сети прямого распространения являются статическими в том смысле, что на заданный вход они вырабатывают одну совокупность выходных значений, не зависящих от предыдущего состояния сети.

Для прогнозирования времени выполнения заданий была создана нейронная сеть, состоящая из трех слоев. Входной слой содержит 50 нейронов с функцией активации «гиперболический тангенс» и принимает на вход полный набор из 214 признаков. Скрытый слой содержит 100 нейронов с функцией активации «гиперболический тангенс». Выходной слой состоит из 6 нейронов с функцией активации softmax. Softmax – это обобщение логистической функции для многомерного случая. Функция преобразует вектор  $z$  размерности  $K$  в век-

тор  $s$  той же размерности, где каждая координата  $s_i$  полученного вектора представлена вещественным числом в интервале  $[0, 1]$  и сумма координат равна 1. Таким образом, на выходе каждого нейрона выходного слоя будет значение вероятности принадлежности задания к одному из 6 ранее определенных классов.

Обучение созданной нейронной сети проводилось на том же наборе данных на протяжении 200 эпох. Кривые точности модели и функции потерь в процессе обучения представлены на рисунке 4.

Приведем результаты точности прогнозирования нейронной сети прямого распространения по классификации заданий: обучающая выборка 1 – 0,83, тестовая выборка 1 – 0,83, обучающая выборка 2 – 0,81, тестовая выборка 2 – 0,81.

Ранжирование признаков по важности для случая нейронной сети прямого распространения приведено в таблице 3.

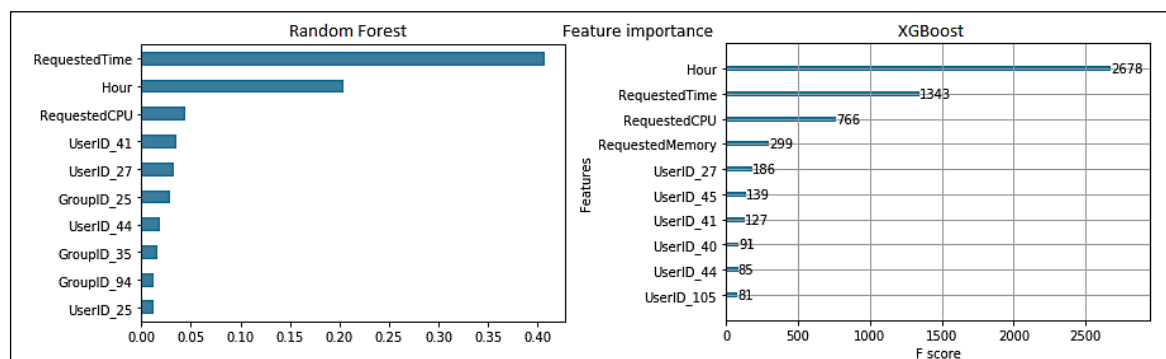


Рис. 3. Ранжирование признаков по важности для алгоритмов случайного леса (Random Forest) и градиентного бустинга (XGBoost)

Fig. 3. Features ranking by importance for the random forest algorithms (Random Forest) and gradient boosting (XGBoost)

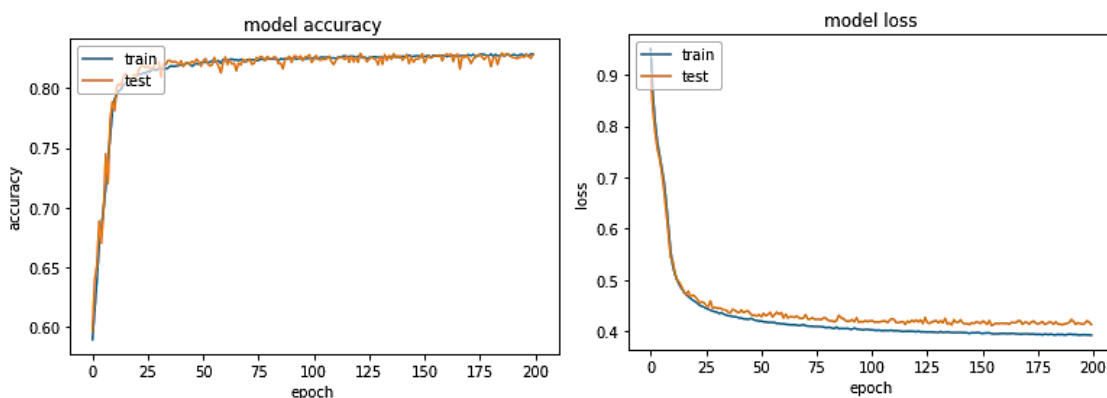


Рис. 4. Кривые точности модели и функции потерь в процессе обучения нейронной сети

Fig. 4. The model accuracy curves and loss functions in the neural network training process

Таблица 3

**Ранжирование признаков по важности  
для нейронной сети прямого распространения**  
Table 3

**Ranking features by importance  
for a feedforward neural network**

| Признак         | Важность (вес)  |
|-----------------|-----------------|
| RequestedTime   | 3,4722 ± 0,0358 |
| UserID_27       | 1,3669 ± 0,0085 |
| GroupID_25      | 1,3261 ± 0,0079 |
| Hour            | 0,8419 ± 0,0105 |
| UserID_41       | 0,7907 ± 0,0077 |
| GroupID_94      | 0,6142 ± 0,0067 |
| RequestedCPU    | 0,5172 ± 0,0050 |
| GroupID_31      | 0,3862 ± 0,0064 |
| UserID_38       | 0,3635 ± 0,0072 |
| UserID_45       | 0,2707 ± 0,0061 |
| GroupID_36      | 0,2662 ± 0,0063 |
| GroupID_35      | 0,2619 ± 0,0038 |
| GroupID_34      | 0,2532 ± 0,0083 |
| GroupID_4       | 0,2328 ± 0,0030 |
| UserID_44       | 0,2244 ± 0,0032 |
| GroupID_99      | 0,2129 ± 0,0062 |
| UserID_40       | 0,2059 ± 0,0074 |
| RequestedMemory | 0,1946 ± 0,0039 |
| UserID_47       | 0,1812 ± 0,0016 |
| GroupID_37      | 0,1698 ± 0,0022 |

Таблица 4 содержит сводные данные по качеству прогнозирования, включая время на обучение и прогнозирование (оценку).

Таблица 4

**Сводные данные по алгоритмам  
прогнозирования**

Table 4

**Summary data by predictive algorithms**

| Алгоритм                               | Обучение | Оценка  | Точность |
|--|----------|---------|----------|
| Логистическая регрессия                | 23 сек.  | <1 сек. | 0,60     |
| Дерево решений к ближайших соседей     | <1 сек.  | <1 сек. | 0,83     |
| 12 сек.                                | 8 мин.   | 0,81    |          |
| Линейный дискриминантный анализ        | 3 сек.   | <1 сек. | 0,59     |
| Метод опорных векторов                 | 15 мин.  | 15 мин. | 0,59     |
| Случайный лес                          | <1 сек.  | <1 сек. | 0,83     |
| Градиентный бустинг                    | 28 сек.  | <1 сек. | 0,78     |
| Нейронная сеть прямого распространения | 30 мин.  | <1 сек. | 0,83     |

На последнем этапе экспериментов было осуществлено сужение границ классов заданий до двоичного порядка, то есть соотношение (1) для некоторого класса заданий было в два (не в десять) раза больше, чем для предыдущего. При таком разбиении на классы ожидаемо снизилась вероятность правильного прогноза, как показано в таблице 5.

Таблица 5

**Вероятность правильного прогноза  
двоичного порядка времени выполнения  
заданий**

Table 5

**The correct forecast probability binary exponent  
time for job execution**

| Выборка      | Случайный лес | Градиентный бустинг | Нейронная сеть прямого распространения |
|--------------|---------------|---------------------|--|
| Обучающая №1 | 0,70          | 0,64                | 0,69                                   |
| Тестовая № 1 | 0,70          | 0,64                | 0,69                                   |

### Заключение

Представленное в настоящей статье исследование показало возможности использования алгоритмов машинного обучения для прогнозирования времени выполнения заданий на основе статистики работы суперкомпьютерной системы коллективного пользования и данных сформированного пользователем паспорта задания. Результаты анализа статистических данных работы суперкомпьютера RIKEN Integrated Cluster of Clusters (RICC), представленных в формате SWF, позволили отобрать значимые признаки потока заданий, было проведено ранжирование признаков по важности и обнаружены скрытые закономерности, влияющие на точность прогнозирования.

Все задания были разделены на шесть классов, основой классификации послужило отношение фактического времени выполнения задания к запрошенному. В каждом классе это отношение возрастало на порядок. Прогнозирование времени выполнения задания осуществлялось путем отнесения задания к одному из классов. Для распространенных алгоритмов машинного обучения были получены оценки вероятности верного прогноза. Наилучшие значения показали алгоритмы дерева решений, случайного леса и нейронные сети прямого распространения.

К недостаткам статистической выборки суперкомпьютера RICC следует отнести скудное информационное наполнение, например, незаполненные поля «номер исполняемого приложения» и «номер раздела» могли бы стать значимыми признаками и иметь заметную корреляцию с фактическим временем выполнения задания.

В дальнейших исследованиях предполагается использовать более полную по сравнению с форматом SWF статистическую информацию работы суперкомпьютера. Это позволит выделить большее количество важных признаков и, соответственно, повысить точность прогнозирования времени выполнения заданий.

*Работа выполнена в МСЦ РАН в рамках проекта по гранту РФФИ № 18-29-03236.*

### **Литература**

1. Reuther A., Byun C., Arcand W., Bestor D., Bergeron B., Hubbell M., Jones M., Michaleas P., Prout A., Rosa A., Kepner J. Scalable system scheduling for HPC and big data. *J. of Parallel and Distributed Computing*, 2018, vol. 111, pp. 76–92. DOI: 10.1016/j.jpdc.2017.06.009.
2. Yoo A.B., Jette M.A., Grondona M. SLURM: simple Linux utility for resource management. *Proc. JSSPP, LNCS*, 2003, vol. 2862, pp. 44–60. DOI: 10.1007/10968987\_3.
3. Henderson R.L. Job scheduling under the portable batch system. *Proc. JSSPP, LNCS*, 1995, vol. 949, pp. 279–294. DOI: 10.1007/3-540-60153-8\_34.
4. IBM spectrum LSF overview. URL: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSWRJV\\_10.1.0/lfs\\_foundations/chap\\_lsf\\_overview\\_foundations.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSWRJV_10.1.0/lfs_foundations/chap_lsf_overview_foundations.html) (дата обращения: 06.02.2020).
5. Баранов А.В., Киселев Е.А., Ляховец Д.С. Квазипланировщик для использования простаивающих вычислительных модулей многопроцессорной вычислительной системы под управлением СУППЗ // *Вестн. ЮУрГУ*. 2014. Т. 3. № 4. С. 75–84. DOI: 10.14529/cmse140405.
6. Klinkenberg J., Terboven C., Lankes S., Müller M.S. Data mining-based analysis of hpc center operations. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Cluster Computing, Honolulu, HI*, 2017, pp. 766–773. DOI: 10.1109/CLUSTER.2017.23.
7. Yoo W., Sim A., Wu K. Machine learning based job status prediction in scientific clusters. *Proc. Computing Conf. SAI, London*, 2016, pp. 44–53. DOI: 10.1109/SAI.2016.7555961.
8. Tuncer O., Ates E., Zhang Y., Turk A., Brandt J., Leung V.J., Egele M., Coskun A.K. Diagnosing performance variations in HPC applications using machine learning. *Proc. ISC*, 2017, vol. 10266, pp. 355–373. DOI: 10.1007/978-3-319-58667-0\_19.
9. McKenna R., Herbein S., Moody A., Gambin T., Taufer M. Machine learning predictions of runtime and IO traffic on high-end clusters. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Cluster Computing, Taipei*, 2016, pp. 255–258. DOI: 10.1109/CLUSTER.2016.58.
10. Rodrigues E.R., Cunha R.L.F., Netto M.A.S., Spriggs M. Helping HPC users specify job memory requirements via machine learning. *Proc. 3rd Intern. Workshop on HUST, Salt Lake City*, 2016, pp. 6–13. DOI: 10.1109/HUST.2016.006.
11. Guo J., Nomura A., Barton R., Zhang H., Matsuoka S. Machine learning predictions for underestimation of job runtime on HPC system. *Proc. SCFA*, 2018, vol. 10776, pp. 179–198. DOI: 10.1007/978-3-319-69953-0\_11.
12. Standard Workload Format. URL: <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/swf.html> (дата обращения: 12.02.2020).
13. Chapin S.J., Cirne W., Feitelson D.G., Jones J.P., Leutenegger S.T., Schwiegelshohn U., Smith W., Talby D. Benchmarks and standards for the evaluation of parallel job schedulers. *Proc. SCFA*, 1999, vol. 1659, pp. 67–90. DOI: 10.1007/3-540-47954-6\_4.
14. Nakata M. All about RIKEN integrated cluster of clusters (RICC). *IJNC*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 206–215. DOI: 10.15803/ijnc.2.2\_206.
15. The RICC log. *Parallel Workloads Archive*. 2010. URL: [https://www.cse.huji.ac.il/labs/parallel/workload/l\\_ricc/index.html](https://www.cse.huji.ac.il/labs/parallel/workload/l_ricc/index.html) (дата обращения: 07.02.2020).
16. Paper D. Introduction to Scikit-Learn. In: *Hands-on Scikit-Learn for machine learning applications*. Apress, 2020, pp. 1–35. DOI: 10.1007/978-1-4842-5373-1\_1.
17. Tolles J., Meurer W.J. Logistic regression: relating patient characteristics to outcomes. *JAMA*, 2016, vol. 316, no. 5, pp. 533–534. DOI: 10.1001/jama.2016.7653.
18. Левитин А.В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. С. 409–417.
19. Altman N. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 1992, vol. 46, no. 3, pp. 175–185. DOI: 10.2307/2685209.

20. McLachlan G.J. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. Wiley InterScience, 1992, 545 p. DOI: 10.1002/0471725293.

21. Вьюгин В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М., 2013. 390 с.

22. Breiman L. Random Forests. Machine Learning, 2001, vol. 45, pp. 5–32.

23. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Ann. Statist., 2001, vol. 29, no. 5, pp. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.

24. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия–Телеком, 2001. 382 с.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.218-228

Received 27.02.20  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 218–228

### Machine learning to predict the supercomputer jobs execution time

**A.V. Baranov**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher,  
antbar@mail.ru, abaranov@jssc.ru

**D.S. Nikolaev**<sup>2</sup>, Senior Researcher, dmitry.s.nikolaev@gmail.com

<sup>1</sup>Joint Supercomputer Center of the RAS – branch of Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the RAS» (SRISA RAS), Moscow, 119334, Russian Federation

<sup>2</sup>Research & Development Institute «Kvant», Moscow, 125438, Russian Federation

**Abstract.** The authors devoted the paper to machine learning methods and algorithms for the supercomputer job execution time predicting. The supercomputer systems statistics for multiple-access shows that the actual execution time for most jobs substantially diverges from the time requested by the user. This reduces the scheduling job efficiency because inaccurate estimates of execution time lead to a suboptimal schedule for job launches.

The paper considers the job classification, which is based on actual time for job performance to the requested one. There were six job classes moreover the ratio of the actual job completion time to the requested time for each class differs by an order of magnitude from the previous class. Statistical data from a shared-use supercomputer system is the basis for predicting the job completion time by assigning the incoming job to one of the classes. The supercomputer RIKEN Integrated Cluster of Clusters (RICC) statistics presented in SWF format were as initial data. The analyzing results for these statistics allowed us to identify significant features of the job flow for machine learning. There was a feature ranking by importance and there were hidden patterns that affect the forecasting accuracy, in particular, there was a mutual correlation for selected features.

For common machine learning algorithms, such as logistic regression, decision tree, k nearest neighbors, linear discriminant analysis, support vector method, random forest, gradient boosting, and direct propagation neural network, there were estimates of the probability of a correct forecast. Algorithms of the decision tree, random forest, and direct propagation neural networks showed the best values.

**Keywords:** high performance computing, grid, job management system, supercomputer job scheduling, machine learning, job complete time prediction.

**Acknowledgements.** The JSCC RAS has done the work was within the RFBR project, grant no. 18-29-03236.

### References

1. Reuther A., Byun C., Arcand W., Bestor D., Bergeron B., Hubbell M., Jones M., Michaleas P., Prout A., Rosa A., Kepner J. Scalable system scheduling for HPC and big data. *J. of Parallel and Distributed Computing*, 2018, vol. 111, pp. 76–92. DOI: 10.1016/j.jpdc.2017.06.009.

2. Yoo A.B., Jette M.A., Grondona M. SLURM: simple Linux utility for resource management. *Proc. JSSPP, LNCS*, 2003, vol. 2862, pp. 44–60. DOI: 10.1007/10968987\_3.

3. Henderson R.L. Job scheduling under the portable batch system. *Proc. JSSPP, LNCS*, 1995, vol. 949, pp. 279–294. DOI: 10.1007/3-540-60153-8\_34.

4. *IBM Spectrum LSF Overview*. Available at: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSWRJV\\_10.1.0/lfsf\\_foundations/chap\\_lsf\\_overview\\_foundations.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSWRJV_10.1.0/lfsf_foundations/chap_lsf_overview_foundations.html) (accessed 06.02.2020).

5. Baranov A.V., Kiselev E.A., Lyakhovets D.S. The quasi scheduler for utilization of multiprocessing computing system's idle resources under control of the management system of the parallel jobs. *Bull. of the*

South Ural State Univ., *Comp. Math. and Soft. Eng.*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 75–84 (in Russ.). DOI: 10.14529/cmse140405.

6. Klinkenberg J., Terboven C., Lankes S., Müller M.S. Data mining-based analysis of hpc center operations. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Cluster Computing*, Honolulu, HI, 2017, pp. 766–773. DOI: 10.1109/CLUSTER.2017.23.

7. Yoo W., Sim A., Wu K. Machine learning based job status prediction in scientific clusters. *Proc. Computing Conf. SAI*, London, 2016, pp. 44–53. DOI: 10.1109/SAI.2016.7555961.

8. Tuncer O., Ates E., Zhang Y., Turk A., Brandt J., Leung V.J., Egele M., Coskun A.K. Diagnosing performance variations in HPC applications using machine learning. *Proc. ISC*, 2017, vol. 10266, pp. 355–373. DOI: 10.1007/978-3-319-58667-0\_19.

9. McKenna R., Herbein S., Moody A., Gamblin T., Taufer M. Machine learning predictions of runtime and IO traffic on high-end clusters. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Cluster Computing*, Taipei, 2016, pp. 255–258. DOI: 10.1109/CLUSTER.2016.58.

10. Rodrigues E.R., Cunha R.L.F., Netto M.A.S., Spriggs M. Helping HPC users specify job memory requirements via machine learning. *Proc. 3rd Intern. Workshop on HUST*, Salt Lake City, 2016, pp. 6–13. DOI: 10.1109/HUST.2016.006.

11. Guo J., Nomura A., Barton R., Zhang H., Matsuoka S. Machine learning predictions for underestimation of job runtime on HPC system. *Proc. SCFA*, 2018, vol. 10776, pp. 179–198. DOI: 10.1007/978-3-319-69953-0\_11.

12. *Standard Workload Format*. Available at: <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/swf.html> (accessed February 12, 2020).

13. Chapin S.J., Cirne W., Feitelson D.G., Jones J.P., Leutenegger S.T., Schwiegelshohn U., Smith W., Talby D. Benchmarks and standards for the evaluation of parallel job schedulers. *Proc. SCFA*, 1999, vol. 1659, pp. 67–90. DOI: 10.1007/3-540-47954-6\_4.

14. Nakata M. All about RIKEN integrated cluster of clusters (RICC). *IJNC*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 206–215. DOI: 10.15803/ijnc.2.2\_206.

15. *The RICC log. Parallel Workloads Archive*. 2010. Available at: [https://www.cse.huji.ac.il/labs/parallel/workload/l\\_ricc/index.html](https://www.cse.huji.ac.il/labs/parallel/workload/l_ricc/index.html) (accessed February 07, 2020).

16. Paper D. Introduction to Scikit-Learn. In: *Hands-on Scikit-Learn for Machine Learning Applications*. Apress, 2020, pp. 1–35. DOI: 10.1007/978-1-4842-5373-1\_1.

17. Tolles J., Meurer W.J. Logistic regression: relating patient characteristics to outcomes. *JAMA*, 2016, vol. 316, no. 5, pp. 533–534. DOI: 10.1001/jama.2016.7653.

18. Levitin A. *Algorithms. Introduction to the Design and Analysis*. Moscow, 2006, pp. 409–417 (in Russ.).

19. Altman N. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 1992, vol. 46, no. 3, pp. 175–185. DOI: 10.2307/2685209.

20. McLachlan G.J. *Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition*. Wiley InterScience, 1992, 545 p. DOI: 10.1002/0471725293.

21. Vyugin V. *Mathematical Foundations of the Theory of Machine Learning and Forecasting*. Moscow, 2013, 390 p. (in Russ.).

22. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, pp. 5–32.

23. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Ann. Statist.*, 2001, vol. 29, no. 5, pp. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.

24. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Artificial Neural Networks. Theory and Practice*. Moscow, 2001, 382 p.

### Для цитирования

Баранов А.В., Николаев Д.С. Применение машинного обучения для прогнозирования времени выполнения суперкомпьютерных заданий // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 218–228. DOI: 10.15827/0236-235X.130.218-228.

### For citation

Baranov A.V., Nikolaev D.S. Machine learning to predict the supercomputer jobs execution time. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 218–228 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.218-228.

УДК 004.056.5  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.229-235

Дата подачи статьи: 02.03.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 229–235

## **Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети**

Т.М. Татарникова<sup>1,2</sup>, д.т.н., доцент, директор, *tm-tatarn@yandex.ru*  
С.Ю. Степанов<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, *stepanov.sergey.y@gmail.com*  
Я.А. Петров<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, *yaroslav.petrov025@gmail.com*  
А.Ю. Сидоренко<sup>1</sup>, старший преподаватель, *sidorenko.ref@gmail.com*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
г. Санкт-Петербург, 192007, Россия

<sup>2</sup> Институт информационных систем и геотехнологий, г. Санкт-Петербург,  
195196, Россия

Для эффективного решения научно-практических и теоретических задач инвентаризации, анализа, моделирования, прогнозирования, управления системами окружающей среды и территориальной организацией сообществ широко используются геоинформационные системы.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методического аппарата для обнаружения возможных угроз в условиях динамики их роста и изменения концепций воздействий на пространственные данные в геоинформационных системах поддержки принятия решений. В ходе работы выполнен анализ требований к структуре систем защиты при обработке информации в геоинформационных системах. Приведен метод решения задач по созданию и поддержке эксплуатации систем защиты пространственной информации в геоинформационных системах.

Для решения задачи выбран и модифицирован алгоритм искусственной нейронной сети для обнаружения распределенных атак типа DDoS, целью которых является отказ в обслуживании и препятствование доступу легитимных пользователей к атакуемому приложению. На основе предложенного алгоритма разработана программа на языке высокого уровня Python. Программа включает в себя ряд компонентов, отвечающих за пополнение базы знаний нейронной сети, что, в свою очередь, позволяет строить произвольные архитектуры искусственной нейронной сети; анализатор трафика пакетов, так называемый сниффер, обеспечивающий фильтрацию пакетов по определенным сетевым протоколам модели взаимодействия открытых систем; связующий модуль, позволяющий направлять данные сниффера в базу знаний искусственной нейронной сети. Нейронная сеть может работать в двух режимах обучения: без учителя (самообучаемая) и с учителем, что, в свою очередь, дает пользователю возможность задавать начальные веса либо загружать файл с готовой базой знаний.

Результаты работы показывают, что искусственная нейронная сеть является одним из механизмов обнаружения потенциально опасных угроз в геоинформационных системах для поддержки принятия управленческих решений.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, пространственные данные, защита данных, геоинформационная система (ГИС), нейронные сети.

Среди многообразия информационных систем геоинформационные системы (ГИС) занимают особое место, поскольку в них к функциональным данным о текущих характеристиках и свойствах объектов реального мира добавляются пространственные данные, что позволяет найти местоположение интересующего объекта, отследить его передвижение, оценить окружающую обстановку и т.п. Развитие цифровых технологий показывает, что практически любая информационная система уже становится или станет в недалеком будущем ГИС. Использование геоинформации расширяет горизонты анализа при принятии решений и позволяет поднять решение прикладных

задач по приоритетным направлениям на качественно новый уровень [1].

ГИС является аппаратно-программным, человеко-машинным (автоматизированным) комплексом, обеспечивающим актуализацию данных благодаря функциям сбора, обработки, отображения, передачи координируемых по пространству и времени данных, а также их интеграцию в представление о территории. Эти функции позволяют решать актуальные научно-практические и теоретические задачи анализа, моделирования, прогнозирования, управления системами окружающей среды и территориальной организацией сообществ и другие.

Популярность приложений ГИС делает их уязвимыми к DDoS-атакам, целью которых является отказ в обслуживании и препятствование доступу легитимных пользователей к атакуемому приложению. По открытым данным Лаборатории Касперского в целом наблюдается динамика роста DDoS-атак по сравнению с другими атаками (рис. 1). Это можно объяснить развитием новых интеллектуальных методов обеспечения информационной безопасности, что со стороны злоумышленника приводит к появлению технически более сложных (умных) атак.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью совершенствования методического аппарата для обнаружения возможных угроз в условиях динамики их роста и изменения концепций воздействий на пространственные данные в ГИС поддержки принятия решений [2].

**Описание предлагаемого решения**

Для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм и реализацию *искусственной нейронной сети* (ИНС) для обнаружения распределенных атак типа DDoS.

За основу взята обобщенная математическая модель искусственного нейрона [3, 4]:

$$out = \phi \left( \sum_{i=1}^n x_i w_i \right),$$

где *out* – выход нейрона;  $\phi$  –

функция активации;  $\sum_{i=1}^n x_i w_i$  – взвешенная сумма.

В качестве функции активации была выбрана сигмоидальная функция:  $\phi(u_k + b_k) =$

$$= \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(u_k + b_k))},$$

где  $\alpha$  – параметр

наклона сигмоиды;  $b_k$  – порог;  $\phi(u_k + b_k)$  – функция активации;  $u_k$  – взвешенная сумма.

Парадигма обучения нейронной сети – обучение с учителем. Идея состоит в том, что веса меняются согласно локальному градиенту функции ошибки [5].

Ошибка обучения на *n*-й итерации оценивается как  $e_j(n) = d_j(n) - y_j(n)$ , где  $e_j(n)$  – сигнал ошибки нейрона *j* на итерации *n*;  $d_j(n)$  – желаемый отклик нейрона *j*;  $y_j(n)$  – сигнал, генерируемый на выходе нейрона *j*.

Целевая функция обучения – ошибка результирующего вектора значений нейронной сети. В работе ошибка оценивалась в виде метрики MSE (Mean Squared Error) – среднеквадратической ошибки по обучающей выборке:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\vec{e} - \tilde{e})^2}{N},$$

где *N* – количество итера-

ций обучения нейронной сети;  $\tilde{e}$  – результирующий вектор ожидаемых значений;  $\vec{e}$  – результирующий вектор получаемых значений.

Таким образом, обучение нейронной сети – это автоматическая корректировка весов на значение:  $\Delta w_{ji} = \alpha \Delta w_{ji}(n - 1) + \eta \delta_j(n) y_i(n)$ , где  $\alpha$  – постоянная момента;  $\eta$  – скорость обучения; *i* – синаптическая связь нейрона *j* с нейроном *i*;  $\delta_j(n)$  – локальный градиент нейрона *j*;  $y_i(n)$  – сигнал от нейрона *i* в нейрон *j*.

Алгоритм процесса обучения ИНС приведен на рисунке 2.

В качестве примеров обучения включены шесть разных видов DDoS-атак: back, land,

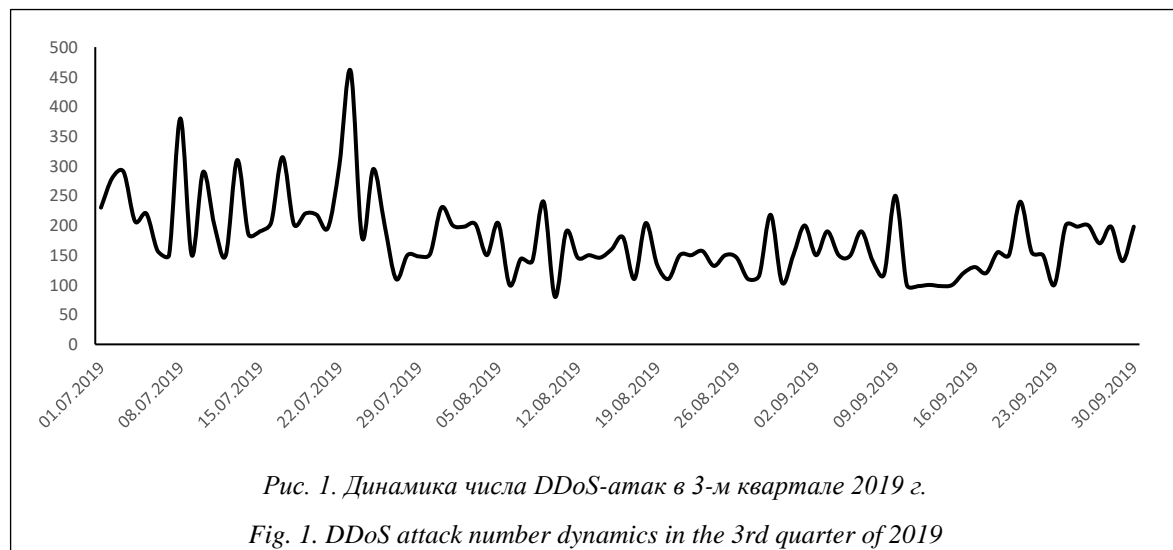
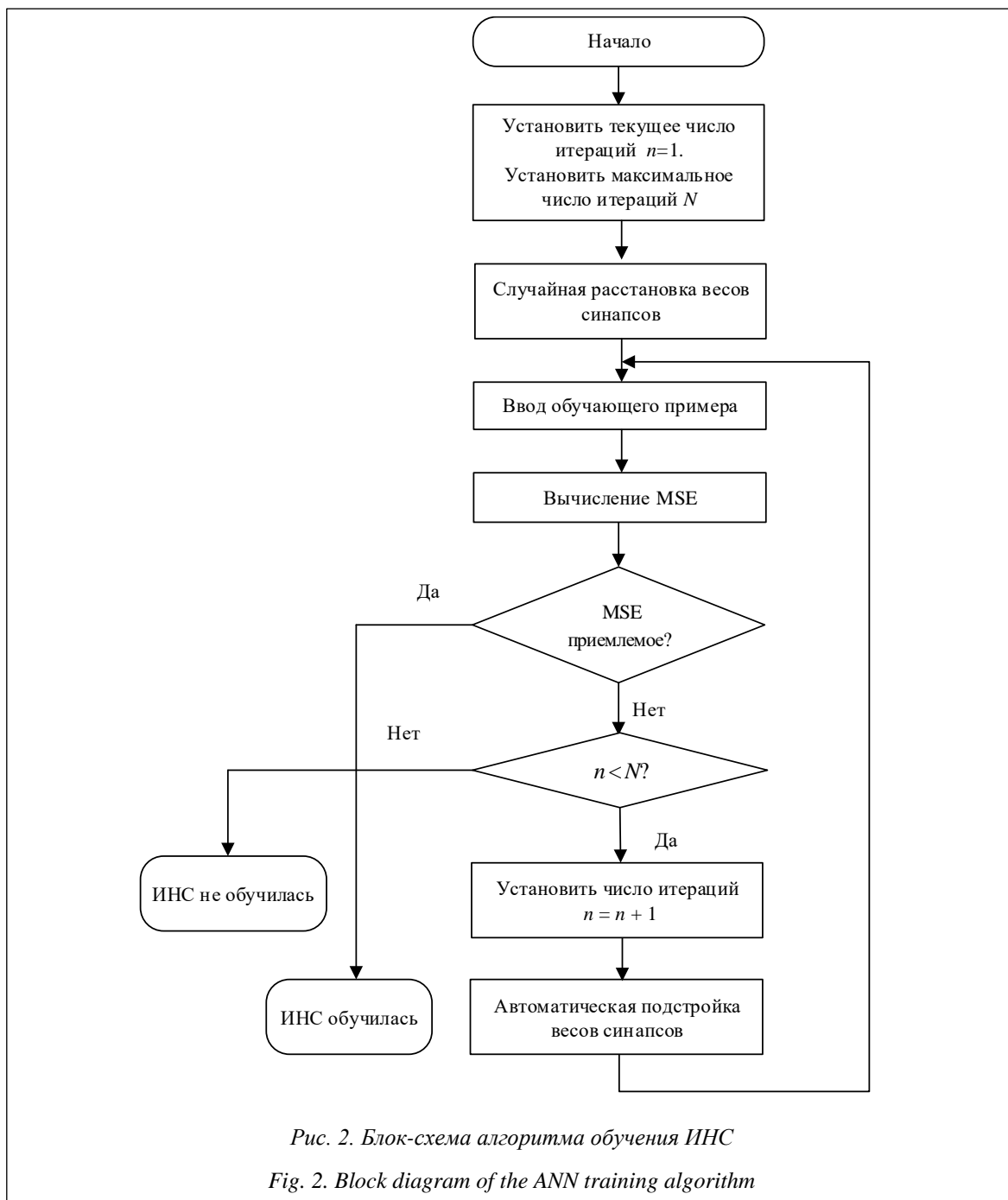


Рис. 1. Динамика числа DDoS-атак в 3-м квартале 2019 г.

Fig. 1. DDoS attack number dynamics in the 3rd quarter of 2019



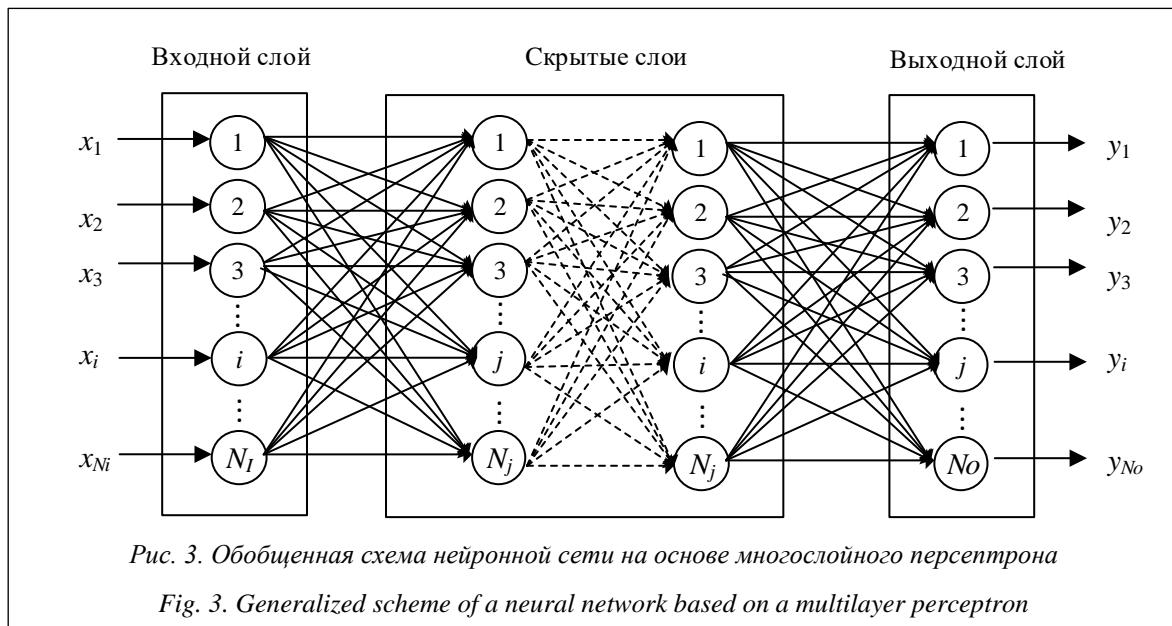


neptune, pod, smurf, teardrop [6], каждая из которой содержит в себе различные параметры сетевого трафика (время соединения, службы, количество переданных байт, состояние порта, ошибочные пакеты, число пакетов с флагом URG и другие).

Для реализации нейронной сети выбран метод многослойного персептрона (рис. 3), архитектура которого в общем виде задается множеством параметров  $A: A = \{H, N_I, N_H, N_O\}$ , где  $H$  – число скрытых слоев;  $N_I$  – размер входного

слоя;  $N_j$  – размер  $j$ -го скрытого слоя,  $j = \overline{1, H}$ ;  $N_O$  – размер выходного слоя [7, 8].

В ходе эксперимента для обучения и тестирования нейронной сети была использована БД атак NSL-KDD [9, 10], каждая запись в ней представляет собой шаблон процесса передачи данных от IP-адреса источника к IP-адресу получателя по определенному протоколу. Шаблон содержит значения параметров и маркировку процесса – атака или не атака. Таким образом, данные, подаваемые на вход ИНС,



представляют собой текстовый файл, содержащий векторы как нормальной, так и аномальной активности. В БД атак NSL-KDD представлено 956 атак типа back, 18 – типа land, 41214 – типа Neptune, 201 – типа pod, 2646 – типа smurf и 892 типа teardrop. В таблице 1 дано краткое описание некоторых параметров, позволяющих идентифицировать ту или иную атаку.

Таким образом,  $N_I = 10$ ,  $N_O = 6$ , а  $N$  и  $N_j$  определены экспериментальным путем.

На основе описанного алгоритма разработана программа на языке Python. Программа включает в себя ряд компонентов, отвечающих за пополнение базы знаний нейронной сети, что, в свою очередь, позволяет строить произвольные архитектуры ИНС; анализ трафика пакетов (модуль сниффер), обеспечивающий фиксацию значений параметров пакетов; парсинг файла БД на векторы (записи) со значениями активности, позволяющий направлять дан-

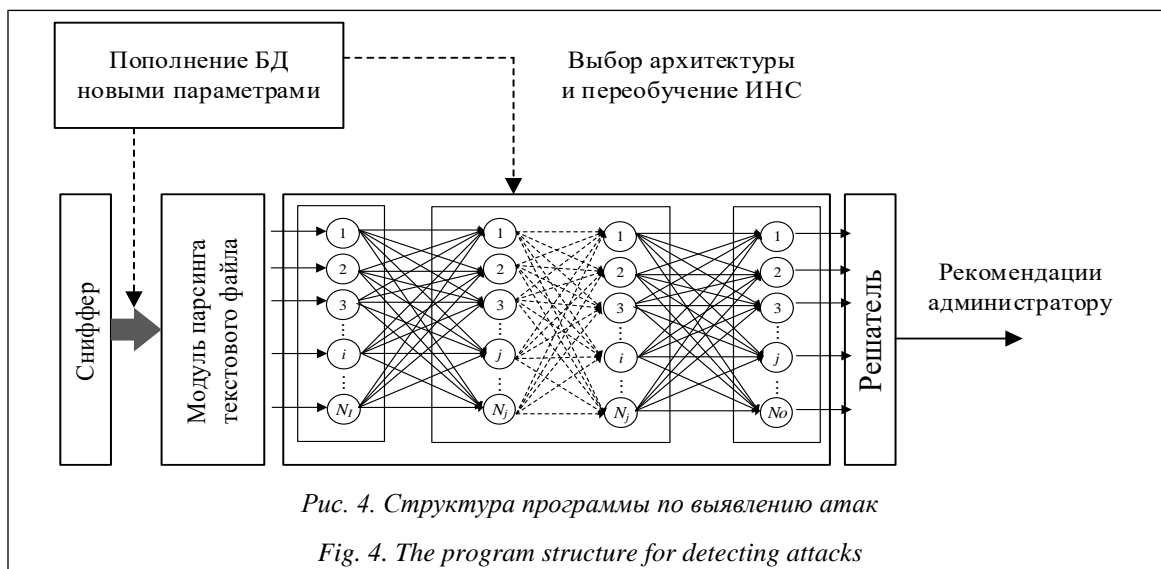
Таблица 1

Параметры из БД NSL-KDD

Table 1

Parameters from the NSL-KDD database

| №  | Параметр                    | Описание   |
|----|-----------------------------|--|
| 1  | count                       | Количество подключений к одному и тому же хосту назначения за последние две секунды                    |
| 2  | dst_host_srv_error_rate     | Процент соединений с SYN-ошибками при соединении по службе из dst_host_srv_count                       |
| 3  | srv_count                   | Число соединений с одной и той же службой за последние две секунды                                     |
| 4  | error_rate                  | Процент соединений с хостом из count с SYN-ошибками  |
| 5  | srv_error_rate              | Процент соединений с SYN-ошибками при соединении по службе из srv_count                                |
| 6  | dst_host_count              | Число соединений с тем же самым ip-адресом хоста назначения  |
| 7  | dst_host_srv_count          | Число соединений с тем же самым номером порта  |
| 8  | dst_host_diff_srv_rate      | Процент соединений по разным службам во время соединения по ip из dst_host_count                       |
| 9  | dst_host_same_src_port_rate | Процент соединений к тому же самому хосту-приемнику во время соединения по порту из dst_host_srv_count |
| 10 | dst_host_error_rate         | Процент соединений с хостом из dst_host_count с SYN-ошибками   |



ные sniffера на вход ИНС и принятие решений о возможных действиях администратора по противодействию выявленной атаке (рис. 4).

9 нейронов скрытого слоя, 6 нейронов выходного слоя. Статистика по обучающей выборке представлена в таблице 2.

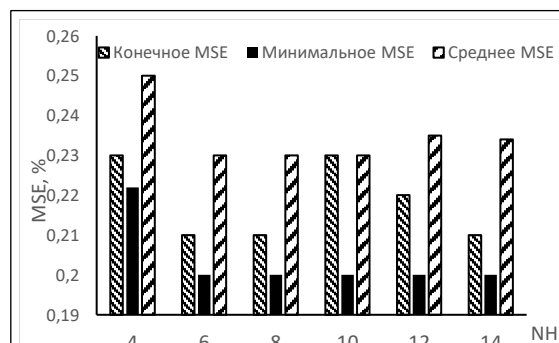
**Анализ результатов**

На рисунке 5 приведена диаграмма зависимости средней MSE от  $H$ , которая показывает, что у нейронной сети с одним скрытым слоем конечная MSE ниже, чем у сети с большим количеством слоев. Анализ зависимости указывает на выбор нейронной сети с одним скрытым слоем.

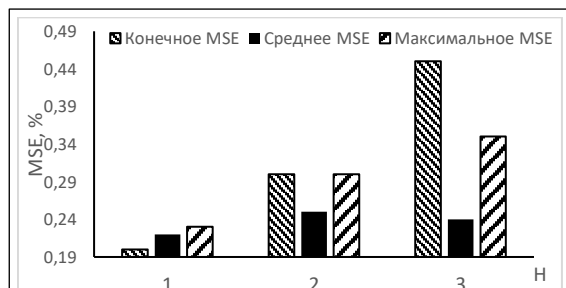
На рисунке 6 приведена диаграмма зависимости средней MSE от  $N_H$ , из которой видно, что конечная MSE приблизительно одинакова на всем разнообразии заданных в условии эксперимента значений  $N_H$ . В таком случае следует обратиться к значениям минимальной MSE. Результаты второго эксперимента указывают на выбор  $N_H \in [6, 14]$ .

В результате эксперимента была построена нейронная сеть со следующей архитектурой: 10 нейронов входного слоя, 1 скрытый слой,

Таблица 2



**Рис. 6. Диаграмма зависимости среднего значения MSE от  $N_H$**   
**Fig. 6. The dependent diagram of MSE average value from  $N_H$**



**Рис. 5. Диаграмма зависимости MSE от  $H$**   
**Fig. 5. The MSE dependent diagram from  $H$**

**Обучающая выборка**

Table 2

**Training sample**

| Тип атаки        | Количество атак |
|------------------|-----------------|
| Отсутствие атаки | 3 500           |
| smurf            | 1 500           |
| back             | 400             |
| teardrop         | 400             |
| neptune          | 3 000           |
| Всего            | 8 800           |

На графике снижения ошибки обнаружения аномального трафика (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/21.jpg>) видно, что число ошибок до оптимизации составляло 0,7 %, после 200 000 итераций ИНС была

оптимизирована до состояния 0,2 % ошибок. Исследование доказывает актуальность использования нейронной сети для обнаружения DDoS-атак и защиты данных в ГИС.

Стоит отметить, что при использовании нейронных сетей и других существующих методов защиты данных в совокупности в будущем возможно многократное повышение степени обнаружения потенциально опасных угроз в ГИС для поддержки принятия управленческих решений, что, в свою очередь, позволит построить эффективную и надежную систему обеспечения информационной безопасности данных.

### Заключение

Для выявления умных атак на ГИС-приложения предложено использовать технологию нейронных сетей. Предназначение нейронной сети – анализ трафика и принятие решения о том, является ли трафик нормальным или аномальным. Решение в виде рекомендаций администратору ГИС может не только информировать пользователя об инциденте или об атаке, но и указать точное время сессии и местоположение (пространственные данные) источника и получателя. Появление новой атаки связано с переобучением нейронной сети.

### Литература

1. Истомина Е.П., Сидоренко А.Ю., Колбина О.Н., Степанов С.Ю., Петров Я.А. Геоинформационная система управления пространственно-распределенными разнородными гидрометеорологическими данными для принятия управленческих решений по оптимизации регулирования отпуска тепла на ТЭЦ // *Естественные и технические науки*. 2019. № 4. С. 134–136.
2. Пилюгина К.Н. Применение нейронных сетей с целью обнаружения вторжений // *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 2. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/02/63248> (дата обращения: 02.02.2020).
3. Гелиг А.Х. Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. М., 2017. 224 с.
4. Каллан Р. Нейронные сети. Краткий справочник. М.: Вильямс, 2017. 288 с.
5. Тархов Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2017. 787 с.
6. Пальчевский Е.В., Христодело О.И. Разработка метода самообучения импульсной нейронной сети для защиты от DDoS-атак // *Программные продукты и системы*. 2019. Т. 32. № 3. С. 419–432. DOI: 10.15827/0236-235X.127.419-432.
7. Татарникова Т.М. Анализ данных. СПб: Изд-во СПбГЭУ, 2018. 85 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Диалектика, 2019. 1104 с.
9. Татарникова Т.М., Сидоренко А.Ю., Степанов С.Ю., Петров Я.А. Реализация метода для защиты пространственных данных ГИС на основе нейронной сети // *Естественные и технические науки*. 2019. № 1. С. 134–136.
10. Частикова В.А., Картамышев Д.А., Власов К.А. Нейросетевой метод защиты информации от DDoS-атак // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1. Ч. 1. С. 183–190.

### Development of a geoinformation systems protecting method and spatial data based on a neural network

**T.M. Tatarnikova**<sup>1,2</sup>, *Dr.Sc. (Engineering), Associate Professor, Director, tm-tatarn@yandex.ru*  
**S.Yu. Stepanov**<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, stepanov.sergey.y@gmail.com*  
**Ya.A. Petrov**<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, yaroslav.petrov025@gmail.com*  
**A.Yu. Sidorenko**<sup>1</sup>, *Senior Lecturer, sidorenko.ref@gmail.com*

<sup>1</sup> *Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, 192007, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Institute of Information Systems and Geotechnologies, St. Petersburg, Russian Federation*

**Abstract.** The GIS usage is necessary for effective solution in scientific, practical and theoretical problems of inventory, analysis, modeling, forecasting, environmental system management, community territorial organization.

The relevance of this paper is due to the need to improve the methodological apparatus for detecting possible threats in the context of their growth dynamics and changing the impact concepts on spatial data in GIS for decision support. In the course of scientific paper, the requirements to the protection system structure, there is analyze during information processing in geographic information systems. The article presents a method for solving problems of creating and supporting the spatial information protection system operation in a GIS.

To solve this problem, the authors selected an artificial neural network algorithm and modified to detect distributed DDoS attacks, the purpose of which is «service denial» and prevent legitimate users from accessing the attacked application.

Based on the presented algorithm, the authors developed a program in a high-level language – Python. This program includes a component number responsible for: replenishing the knowledge base of a neural network, which in turn allows you to build arbitrary ANN architectures; packet traffic analyzer, the so-called sniffer, which provides packet filtering according to certain network protocols of the OSI model; a connecting module that allows you to send sniffer data to the ANN knowledge base. The resulting neural network can operate in two training modes: without teacher (self-taught), with teacher, which in turn allows the user to set the initial weights, or specify a file with a ready-made knowledge base.

**Keywords:** information security, spatial data, data protection, GIS, neural networks.

### References

1. Istomin E.P., Sidorenko A.Yu., Kolbina O.N., Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A. Geoinformation system for managing spatially distributed heterogeneous hydrometeorological data for making managerial decisions to optimize the regulation of heat supply at thermal power plants. *Natural and Tech. Sci.*, 2019, no. 4, pp. 134–136 (in Russ.).
2. Piliugina K.N. Artificial neural network approaches to intrusion detection. *Modern Scientific Researches and Innovations*, 2016, no. 2. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2016/02/63248> (accessed February 02, 2020) (in Russ.).
3. Gelig A.Kh. *Introduction to the Mathematical Theory of Learner Recognition Systems and Neural Networks*. Moscow, 2017, 224 p. (in Russ.).
4. Callan R. *Neural Networks. A Quick Reference*. Moscow, Williams, 2017, 288 p. (in Russ.).
5. Tarkhov D.A. *Neural Network Models and Algorithms*. Moscow, 2017, 787 p. (in Russ.).
6. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I. Development of a spiking neural network with the possibility of high-speed training to neutralize DDoS attacks. *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 3, pp. 419–432. DOI: 10.15827/0236-235X.127.419-432 (in Russ.).
7. Tatarnikova T.M. *Data Analysis*. St. Petersburg, 2018, 85 p. (in Russ.).
8. Khaikin S. *Neural Networks: Full Course*. Moscow, 2019, 1104 p. (in Russ.).
9. Tatarnikova T.M., Sidorenko A.Yu., Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A. Implementation of a method for protecting spatial GIS data based on a neural network. *Natural and Tech. Sci.*, 2019, no. 1, pp. 134–136 (in Russ.).
10. Chastikova V.A., Kartamyshev D.A., Vlasov K.A. The neural network method of protecting information from DDoS attacks. *Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 1, pt. 1, pp. 183–190 (in Russ.).

### Для цитирования

Татарникова Т.М., Степанов С.Ю., Петров Я.А., Сидоренко А.Ю. Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 229–235. DOI: 10.15827/0236-235X.130.229-235.

### For citation

Tatarnikova T.M., Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A., Sidorenko A.Yu. Development of a geoinformation systems protecting method and spatial data based on a neural network. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 229–235 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.229-235.

УДК 5.13.11

Дата подачи статьи: 20.11.19

DOI: 10.15827/0236-235X.130.236-242

2020. Т. 33. № 2. С. 236–242

## **Программный модуль автоматизированного расчета параметров экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия**

Л.А. Зинченко <sup>1</sup>, д.т.н., профессор, [lyudmillaa@mail.ru](mailto:lyudmillaa@mail.ru)

В.В. Казаков <sup>1</sup>, студент, [kazakov.VADIM.2012@yandex.ru](mailto:kazakov.VADIM.2012@yandex.ru)

А.А. Миронов <sup>1</sup>, студент, [andrey\\_308@mail.ru](mailto:andrey_308@mail.ru)

А.В. Дорофеев <sup>1</sup>, студент, [alexanderzloizebroo@gmail.com](mailto:alexanderzloizebroo@gmail.com)

С.С. Кобылкин <sup>1</sup>, студент, [kobytkinserh@gmail.com](mailto:kobytkinserh@gmail.com)

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», г. Москва, 105005, Россия

При проектировании экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия требуется проводить большое количество расчетов. Существующая методическая база для расчета таких экранов не позволяет выполнять автоматизированный анализ и обработку данных, полученных в результате расчетов, и проектировщику приходится делать это вручную.

Статья посвящена особенностям разработанного программного модуля, позволяющего автоматизировать процессы расчета параметров экранов защиты электронной аппаратуры от радиационного воздействия и влияния воздействия тяжелых заряженных частиц на экран радиационной защиты, а также осуществлять оценку стойкости различных проектных решений к воздействию тяжелых заряженных частиц.

Предложена клиент-серверная архитектура, с помощью которой можно организовать многопоточный расчет защитных экранов на множестве подключенных клиентов. Разработана база хранения уже рассчитанных параметров экранов с доступом онлайн. Детально рассмотрен принцип работы всей системы, а также представлены варианты сценариев ее использования. Разработан веб-интерфейс, позволяющий вносить данные для расчетов с любых устройств, имеющих доступ в Интернет, а также просматривать результаты уже проведенных расчетов.

Тестирование проводилось на серверах, где разработанный программный модуль показал стабильную работоспособность.

**Ключевые слова:** защитный экран, SRIM, клиент-серверная архитектура, web-интерфейс, заряженные частицы, автоматизация, распределенные вычисления.

Для решения различных задач космической программы РФ широко применяется электронная аппаратура. Использование микросхем обусловлено минимизацией веса устройств, проектируемых для космических приложений. Однако при проектировании бортовой электронной аппаратуры для работы в специфических условиях необходимо обеспечить ее защиту от радиационных воздействий [1–3].

При прохождении космического аппарата через пояс Ван Аллена бортовая электронная аппаратура подвергается воздействию *тяжелых заряженных частиц* (ТЗЧ) [3], электронов и т.п. В результате микросхемы могут накапливать заряд, полученный от ТЗЧ [4–6]. В частности, под воздействием ТЗЧ могут меняться биты данных в памяти микросхемы, в результате чего возможны сбои и некорректная работа бортовой электронной аппаратуры. При

этом наибольшей проникающей способностью в материал обладают протоны. В связи с этим возникает необходимость проектирования экранов радиационной защиты для обеспечения нужного уровня защиты бортовой электронной аппаратуры от протонов.

Допустимую толщину экрана для защиты от воздействия высокоэнергетичных ионов на различные материалы определяет комплекс программ SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [7–9] или TRIM (Transport of Ions in Matter) [10–12]. Отметим, что программный комплекс SRIM не обновлялся с 2013 года, о чем свидетельствует дата последней версии [13]. В работе [14] эта методика была расширена для расчета параметров многослойных экранов радиационной защиты.

Одним из серьезных недостатков применения программы SRIM/TRIM в таких расчетах

является сложность конфигурирования для выполнения расчета и анализа полученных данных, что требует значительных временных затрат инженера-проектировщика на исследование различных альтернативных проектных решений. Недостатком SRIM/TRIM является и необходимость ручного ввода: для расчета каждого альтернативного проектного решения требуется подготовить файл с входными параметрами или воспользоваться генератором входного файла. Оба метода используются для каждого расчета индивидуально, они нетривиальны и требуют определенных знаний по использованию программы SRIM/TRIM. В настоящее время это ПО доступно в двух версиях: TRIM для операционной системы DOS (также может работать в Windows в режиме эмуляции DOS) и SRIM для операционной системы Windows.

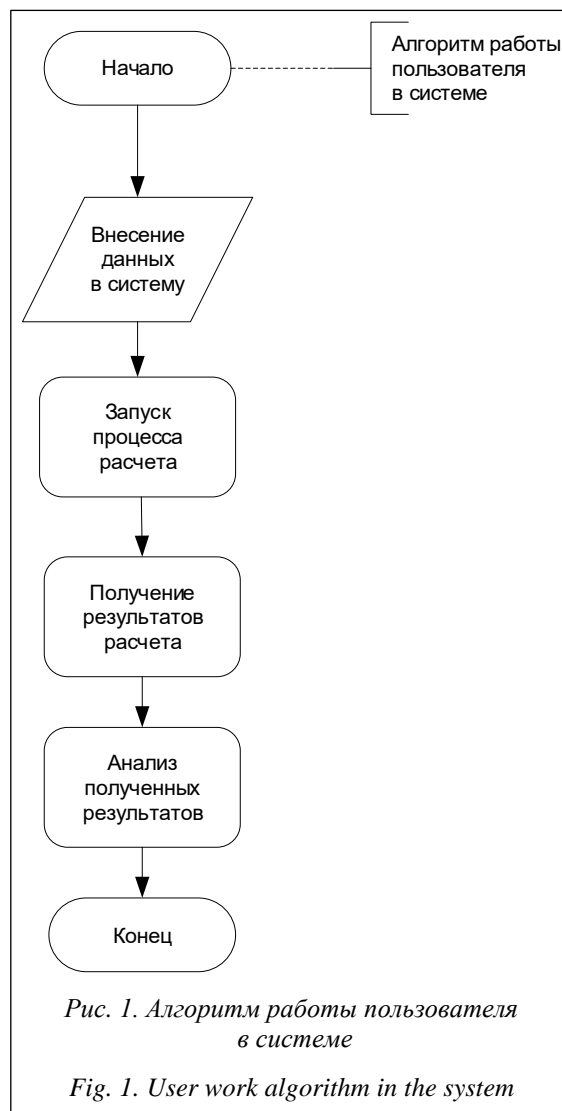
Необходимость разработки программного модуля автоматизации расчетов экранов радиационной защиты объясняется большим количеством альтернативных проектных решений, на проверку которых тратится много времени, при этом задача может быть формализуемой.

В данной статье описано разработанное ПО для автоматизации расчетов параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия ТЗЧ.

### Разработка и реализация программного модуля расчета параметров экранов защиты электронной аппаратуры от ТЗЧ

Программный модуль предназначен для автоматизации расчета параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия ТЗЧ. Для решения поставленной задачи была проанализирована последовательность действий для получения искомых параметров. Для каждого материала, используемого в экране, необходимо подготовить входной файл расчета, запустить расчет и результаты его сохранить в файле. На последнем этапе нужно провести анализ полученных данных и сделать выводы о целесообразности использования того или иного проектного решения.

Каждый из перечисленных этапов работы можно реализовать в автоматическом режиме. На рисунке 1 представлен предложенный алгоритм работы пользователя с системой. На первом этапе пользователь вводит необходимые параметры для расчета: энергия протона, параметры мишени – толщина и материал. При



этом можно использовать уже имеющиеся в БД материалы или новые. После задания необходимых параметров исследователь может передать задачу на расчет, по окончании которого пользователь получает данные и может их проанализировать.

Для реализации распределенных вычислений была выбрана клиент-серверная архитектура (рис. 2).

При разделении исходной задачи на отдельные подзадачи на сервер были возложены следующие функции:

- хранение данных для расчета;
- хранение результатов расчета;
- управление расчетом множества альтернативных проектных решений;
- обработка результатов расчета (визуализация и анализ результата расчета одного проектного решения, а также сравнительный анализ различных проектных решений).

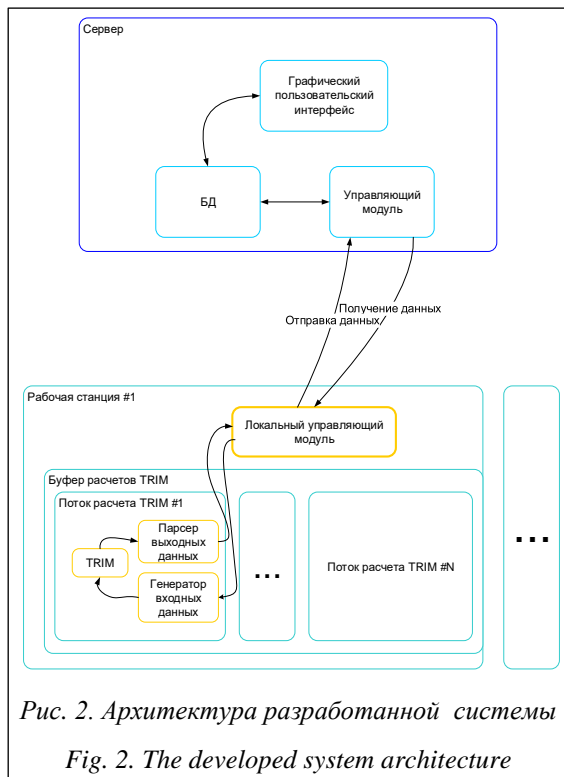


Рис. 2. Архитектура разработанной системы  
Fig. 2. The developed system architecture

На клиента были возложены следующие задачи:

- получение данных для расчета из множества альтернативных проектных решений;
- генерация входного файла для расчета;
- расчет многослойных экранов с помощью программы SRIM/TRIM (далее SRIM);
- парсинг файлов результатов расчета;
- отправка данных на сервер.

Такой подход позволил реализовать распределенную систему вычислений.

На рисунке 3 представлен алгоритм работы подсистемы, отвечающей за управление очередью задач расчета. Основной целью данной подсистемы является распределение задач на клиентские машины, а также получение результатов расчетов.

На рисунке 4 приведен алгоритм работы подсистемы расчета. Основная цель данной подсистемы – получение очередной задачи для расчета и запуск моделирования. После окончания расчета подсистема отправляет результаты на сервер.

Клиент разделен на несколько программно независимых модулей (рис. 2). Основным является Локальный управляющий модуль. Он отвечает за получение данных о расчете, запуск расчета, управляет потоками расчета, отправляет данные на сервер. Модуль написан на языке программирования C++ с использова-

нием фреймворка QT, что позволило обеспечить кроссплатформенность решения. Блок Генератор входных данных получает данные о расчете и на их основе генерирует входной файл для программы SRIM/TRIM. Генератор разработан на языке C++ и является отдельным модулем. После окончания расчетов блок Парсер выходных данных обрабатывает выходные файлы SRIM и генерирует выходные данные.

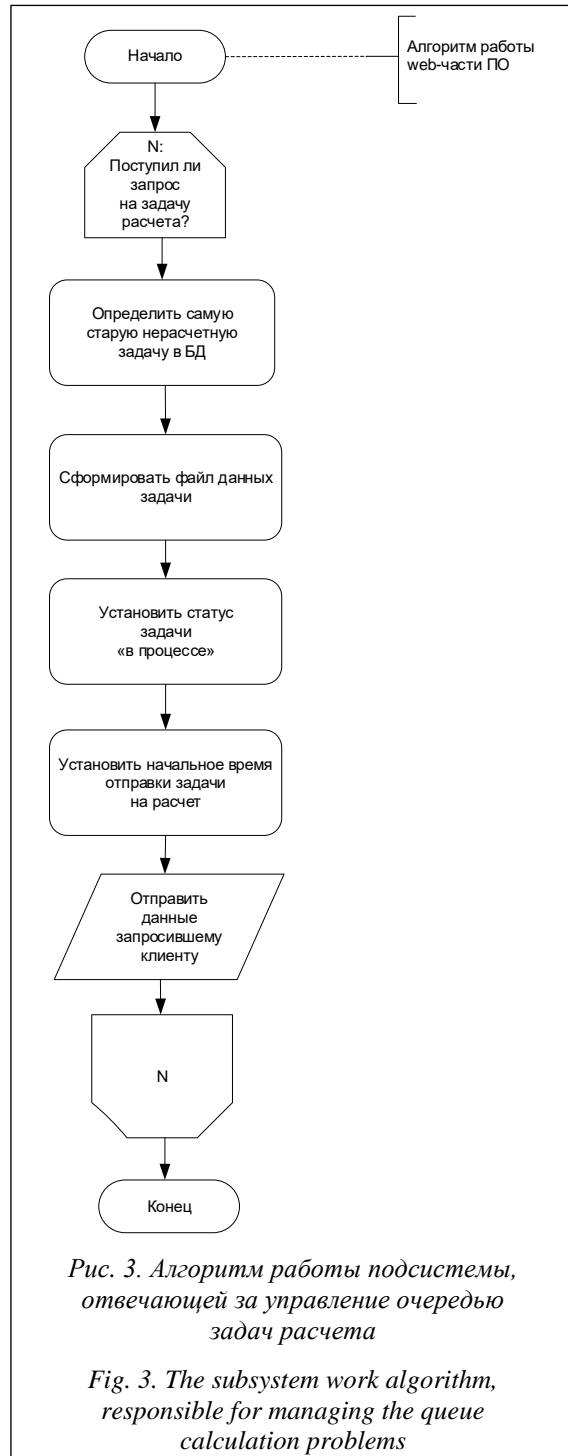
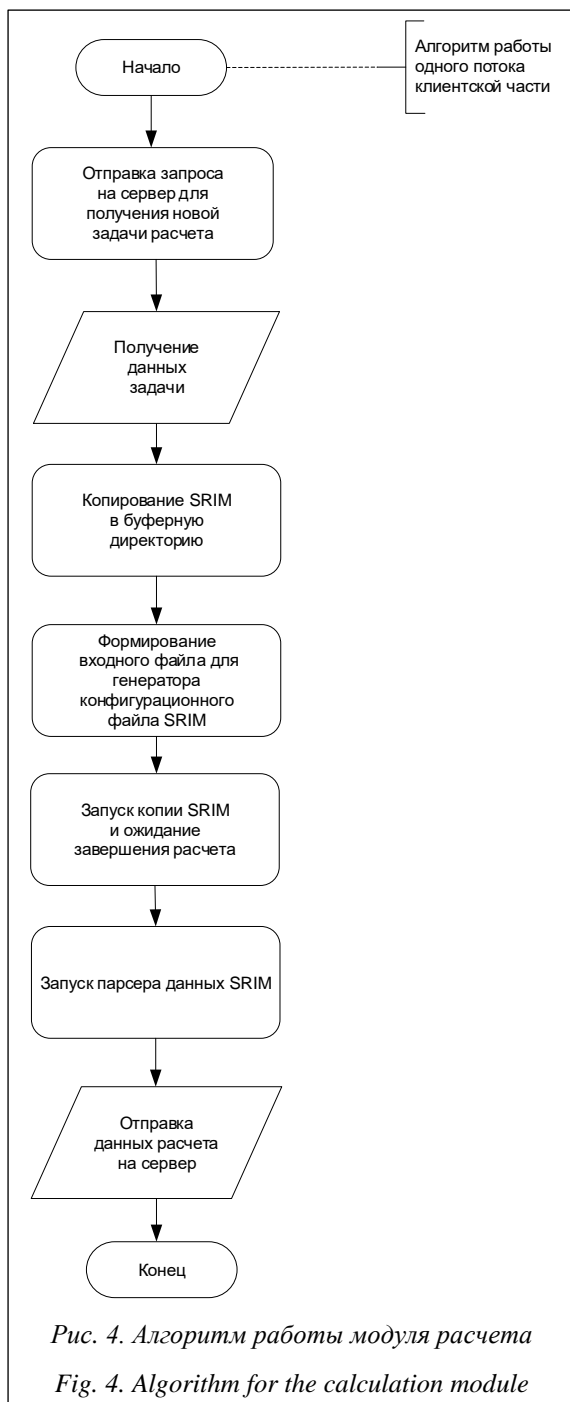


Рис. 3. Алгоритм работы подсистемы, отвечающей за управление очередью задач расчета

Fig. 3. The subsystem work algorithm, responsible for managing the queue calculation problems





Парсер написан на языке программирования Python. Такой выбор объясняется тем, что этот язык наиболее подходит для задач анализа текстовой информации и визуализации решений. Блок TRIM включает скопированные в буферную папку файлы программы SRIM.

Для реализации многопоточности контролирующий модуль программно создает новую папку для потока расчета, копирует туда SRIM, парсер и конвертер, генерирует файл для генератора по данным о последней задаче в множе-

стве расчетов на сервере, запускает генератор. После окончания работы генератора запускается SRIM, после окончания расчета запускается парсер, который, обработав полученный выходной файл, отправляет данные на сервер.

После выполнения всех операций на клиенте сервер получает данные о расчете и изменяет статус задачи в множестве расчета как рассчитанную. Также сервер сохраняет расчет, полученный от клиента.

Предложенный подход позволяет масштабировать ПО, запуская программу-клиент на большем числе компьютеров. Ограничением в выбранном подходе служит нагрузочная способность сервера, который отправляет данные на расчет и получает результаты.

Так как интерфейс добавления задач расположен на сервере, добавление задачи для расчета можно сделать с любого устройства с доступом в Интернет. Результаты расчета также можно просмотреть с любого устройства, имеющего доступ в Интернет, так как интерфейс анализа результатов располагается на сервере.

Блок Графический пользовательский интерфейс служит для добавления задач в множество расчетов и для анализа результатов расчета. Управляющий модуль содержит набор скриптов для получения и отправки данных на клиентские приложения для расчета. Блок БД хранит всю необходимую информацию для работы системы. Блок расчета TRIM #1 представляет параллельно идущие процессы расчета, контролируемые Локальным управляющим модулем. Масштабировать систему можно, добавляя клиенты (персональные компьютеры) в кластер. Также есть возможность добавлять на каждом клиенте количество потоков для расчета.

Веб-интерфейс разработан с использованием фреймворка Bootstrap для разработки интерфейсов [15]. Преимуществами этого фреймворка являются кроссбраузерность, поддержка различных разрешений экранов и т.п.

Разработанный пользовательский интерфейс (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/4.jpg>) логически разделен на две части: страницу ввода данных об экранах и страницу вывода результатов расчета.

Слева отображается меню программного модуля. Основное окно отображает интерфейс для редактирования БД программного модуля. В разработанной системе все данные для расчета вводятся в специальные формы в соответствующие поля. Введенные данные в дальнейшем можно редактировать или удалять, а также

использовать для последующих расчетов. При моделировании процесса проникновения ионов в материал экрана необходимо записать в соответствующую форму данные о материале с подробным описанием составляющего его сплава. Все данные можно просмотреть в соответствующем разделе на главной странице разработанного модуля. После внесения всех исходных данных необходимо поставить задачу в очередь на расчет. После окончания расчета результаты представляются на странице отчетов о выполнении расчетов в табличной форме. Также в выходных данных имеется информация о средней глубине проникновения ТЗЧ в исследуемый материал. Отметим, что такой информации в программе SRIM в явном виде нет, что затрудняет оценку альтернативных проектных решений.

Для тестирования работоспособности разработанного программного модуля было проведено сравнение результатов, полученных по методике [14], основанной на ручных операциях, и с использованием разработанного модуля. Клиентские машины представляли собой персональный компьютер следующей конфигурации: процессор – Intel Core i7-8565U, 4 ядра, 8 потоков; оперативная память – 16 Гб; графический ускоритель – NVIDIA GeForce MX150, Intel UHD Graphics 620.

Для тестирования работы программного модуля были заданы следующие параметры мишени (экрана защиты электронной аппаратуры

от воздействия ТЗЧ): для слоя 1: материал – алюминий, толщина – 2 мм; для слоя 2: материал – вольфрам, толщина – 1 мм.

Все слои располагались перпендикулярно относительно направления обстрела. В качестве падающей заряженной частицы были заданы ионы водорода с энергией 30 МэВ.

Как по ручной методике [14], так и с использованием разработанного программного модуля были получены одинаковые результаты расчета: средняя глубина проникновения ионов водорода с энергией 30 МэВ в многослойный экран защиты электронной аппаратуры – 2,58 мм, что свидетельствует о работоспособности программного модуля.

### Заключение

В статье рассмотрены особенности реализации разработанного программного модуля автоматизации расчетов параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. Выбранная клиент-серверная архитектура позволяет обеспечить удаленный доступ к параметрам уже рассчитанных экранов, а также расчет альтернативных проектных решений с использованием распределенных вычислений. Таким образом, реализованное ПО позволяет производить скоростную обработку информации и моделирование параметров экранов защиты в автоматизированном режиме.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-29-18043 мк.*

### Литература

1. Shakhnov V., Zinchenko L., Kosolapov I., Filippov I. Modeling and optimization of radiation tolerant microsystems. Proc. EMS'14, 2014, pp. 484–489.
2. Глушко А.А., Зинченко Л.А., Шахнов В.А. Моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на характеристики полевых транзисторов структуры «кремний на изоляторе» // Радиотехника и электроника. 2015. № 10. С. 1090–1096. DOI: 10.7868/s0033849415070074.
3. Кузнецов Н.В. Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/index.html> (дата обращения: 15.11.2019).
4. Новиков Л.С., Милеев В.Н., Воронина Е.Н., Галанина Л.И., Маклецов А.А., Синолиц В.В. Радиационные воздействия на материалы космической техники // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 3. С. 32–48.
5. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе. М.: Атомиздат, 1971. 318 с.
6. Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л. Способы построения отказоустойчивых цифровых микросхем и оценки вероятности их отказа, вызванного облучением. М., 2019. 113 с.
7. Biersack J.P., Haggmark L. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. Nuclear Instruments and Methods, 1980, vol. 174, pp. 257–269. DOI: 10.1016/0029-554X(80)90440-1.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. NY, 1985, 321 p.
9. Ziegler J.F. SRIM-2003. Nuclear instruments and methods in physics research: Section B, 2004, vol. 219–220, pp. 1027–1036. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.208.

10. Galdikas A. Interaction of ions with condensed matter. NY, Nova Publ., 2000, 176 p.
11. Ziegler J.F. RBS/ERD simulation problems: Stopping powers, nuclear reactions and detector resolution. Nuclear instruments and methods in physics research: Section B, 1998, vol. 136–138, pp. 141–146. DOI: 10.1016/S0168-583X(97)00664-2.
12. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM – the stopping and range of ions in matter. 2010, vol. 268, iss. 11–12, pp. 1818–1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
13. SRIM-CODE. URL: [http://www.ujfi.fei.stuba.sk/srim\\_support/](http://www.ujfi.fei.stuba.sk/srim_support/) (дата обращения: 15.11.2019).
14. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Глушко А.А., Никитин И.В. Методика определения толщины экрана из многослойного материала для защиты микроэлектромеханических систем от воздействия протонов // XII Междунар. науч.-технич. конф. ПТСПИ: сб. матер. Суздаль, 2017. С. 91–93.
15. Bootstrap documentation. Framework for development web user interfaces. URL: <https://getbootstrap.com/docs/4.4/getting-started/introduction/> (дата обращения: 15.11.2019).

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.236-242

Received 20.11.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 236–242

### Software module for automated calculation parameters for on-board electronic protection screens radiation protection equipment

*L.A. Zinchenko*<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, [lyudmillaa@mail.ru](mailto:lyudmillaa@mail.ru)  
*V.V. Kazakov*<sup>1</sup>, Master Student, [kazakov.VADIM.2012@yandex.ru](mailto:kazakov.VADIM.2012@yandex.ru)  
*A.A. Mironov*<sup>1</sup>, Bachelor Student, [andrey\\_308@mail.ru](mailto:andrey_308@mail.ru)  
*A.V. Dorofeev*<sup>1</sup>, Bachelor Student, [alexanderzloizebroo@gmail.com](mailto:alexanderzloizebroo@gmail.com)  
*S.S. Kobylkin*<sup>1</sup>, Bachelor Student, [kobylkinserh@gmail.com](mailto:kobylkinserh@gmail.com)

<sup>1</sup> *Bauman Moscow State Technical University, Department “Design and Production Technology of Electronic Equipment”, Moscow, 105005, Russian Federation*

**Abstract.** When designing screens to protect onboard electronic equipment from radiation exposure, we need to perform a large number of calculations. The existing methodological base for calculating such screens does not allow performing automated analysis and processing of data obtained as a result of calculations, and the designer has to do this manually.

The article highlights the developed software module features that allow you to automate the calculating process for the electronic equipment safety shield parameters from radiation exposure.

The developed software module allows you to automate the process for calculating the effects of heavy charged particles on the radiation protection screen and evaluate the resistance of various design solutions to the effects of heavy charged particles.

The article offers a client-server architecture that can be used to organize the multithreaded calculation of safety shields on multiple connected clients. There is a database for storing already calculated screen parameters with online access. There is a principle of operation of the entire system in detail, as well as options for use cases. The authors have developed a web interface that allows you to enter data for calculations from any devices that have Internet access, as well as view the calculation results that have already been performed.

Testing was on servers where the developed software module showed stable performance.

**Keywords:** shield, SRIM, client-server architecture, WEB interface, charged particles, automation, distributed calculations.

**Acknowledgements.** This work was with partial support by RFBR, project no. 18-29-18043 МК.

### References

1. Shakhnov V., Zinchenko L., Kosolapov I., Filippov I. Modeling and optimization of radiation tolerant microsystems. *Proc. EMS '14*, 2014, pp. 484–489.
2. Glushko A.A., Zinchenko L.A., Shakhnov V.A. Modeling of influence of heavy charged particles on characteristics of field transistors of structure "silicon on insulator". *Radio Engineering and Electronics*, 2015, no. 10, pp. 1090–1096. DOI: 10.7868/s0033849415070074 (in Russ.).

3. Kuznetsov N.V. *Radiation Danger in Near-Earth Orbits and Interplanetary Trajectories of Spacecraft*. Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/index.html> (accessed November 15, 2019).
4. Novikov L.S., Mileev V.N., Voronina E.N., Galanina L.I., Makletsov A.A., Sinolic V.V. Radiation effects on materials in space technology. *Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies*, 2009, no. 3, pp. 32–48 (in Russ.).
5. Khaffner Dzh. *Nuclear Radiation and Protection in Space* (Russ. ed.: Moscow, 1971, 318 p.).
6. Alexandrov P.A., Zhuk V.I., Litvinov V.L. *Methods of Constructing Fault-Tolerant Digital Chips and Assessing the Probability of their Failure Caused by Radiation*. Moscow, 2019, 113 p. (in Russ.).
7. Biersack J.P., Haggmark L. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. *Nuclear Instruments and Methods*, 1980, vol. 174, pp. 257–269. DOI: 10.1016/0029-554X(80)90440-1.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids*, NY, 1985, 321 p.
9. Ziegler J.F. SRIM-2003. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section B*, 2004, vol. 219–220, pp. 1027–1036. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.208.
10. Galdikas A. *Interaction of Ions with Condensed Matter*. NY, Nova Publ., 2000, 176 p.
11. Ziegler J.F. RBS/ERD simulation problems: Stopping powers, nuclear reactions and detector resolution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section B*, 1998, vol. 136–138, pp. 141–146. DOI: 10.1016/S0168-583X(97)00664-2.
12. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. *SRIM – the Stopping and Range of Ions in Matter*. 2010, vol. 268, iss. 11–12, pp. 1818–1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
13. *SRIM-CODE*. Available at: [http://www.ujfi.fei.stuba.sk/srim\\_support/](http://www.ujfi.fei.stuba.sk/srim_support/) (accessed November 15, 2019).
14. Shakhnov V.A., Zinchenko L.A., Glushko A.A., Nikitin I.V. Method for determining the thickness of a screen made of a multilayer material to protect microelectromechanical systems from the effects of protons. *Proc. Conf. PTMM*, Suzdal, 2017, pp. 91–93 (in Russ.).
15. *Bootstrap Documentation. Framework for Development Web User Interfaces*. Available at: <https://get-bootstrap.com/docs/4.4/getting-started/introduction/> (accessed November 15, 2019).

#### Для цитирования

Зинченко Л.А., Казаков В.В., Миронов А.А., Дорофеев А.В., Кобылкин С.С. Программный модуль автоматизированного расчета параметров экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 236–242. DOI: 10.15827/0236-235X.130.236-242.

#### For citation

Zinchenko L.A., Kazakov V.V., Mironov A.A., Dorofeev A.V., Kobylkin S.S. Software module for automated calculation parameters for on-board electronic protection screens radiation protection equipment. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 236–242 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.236-242.

УДК 004.896  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.243-249

Дата подачи статьи: 13.12.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 243–249

## **Разработка системы управления педипуляторами антропоморфного робота AP-601M**

М.В. Тарачков<sup>1</sup>, аспирант, *mishklgpmi@mail.ru*  
О.В. Толстель<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, *tolstel.oleg@mail.ru*  
А.А. Калабин<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., профессор, *akalabin@yandex.ru*

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,  
Институт физико-математических наук и информационных технологий,  
г. Калининград, 236002, Россия

<sup>2</sup> Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

В статье представлена реализация системы управления педипуляторами для антропоморфного робота AP-601M. Предложенная система управления состоит из драйвера, обеспечивающего взаимодействие бортового компьютера с главным микроконтроллером робота, и управляющей программы, решающей задачу обратной кинематики и позволяющей осуществлять планирование движений каждого педипулятора в заданную точку. Также управляющая программа обладает графическим интерфейсом для отображения трехмерной модели робота в пространстве.

Для построения данной системы управления педипуляторами была использована свободно распространяемая программная платформа Robot Operating System (ROS), в частности, пакеты ROS\_Control для реализации низкоуровневого взаимодействия, MoveIt! для планирования движений, RViz для визуализации. Вследствие этого необходима операционная система Linux Ubuntu 16.04. Комплекс программ для управления педипуляторами написан на языке программирования C++. Выбор языка программирования обусловлен тем, что для решения данной задачи необходимы наилучшее быстродействие и соизмеримый с этим объем затрат на написание кода. Для языка C++ существует библиотека ввода-вывода ASIO, при помощи которой и выполняется взаимодействие с контроллером робота.

В статье приведены результаты эксперимента по использованию предложенной системы управления педипуляторами антропоморфного робота AP-601M, а также возможные варианты применения описанной программы.

Разработанная система управления педипуляторами создает уровень абстракции между аппаратным и программным обеспечением, что позволяет исследователям сконцентрироваться на решении задачи хождения. Кроме того, программа обладает удобным графическим визуализатором.

Рассматривается возможность доработки программы для использования в ее составе инерциально-измерительного модуля, который позволит получать данные об ускорениях и угловых скоростях робота, а после применения к ним фильтра Калмана или Маджвика – углы ориентации в пространстве.

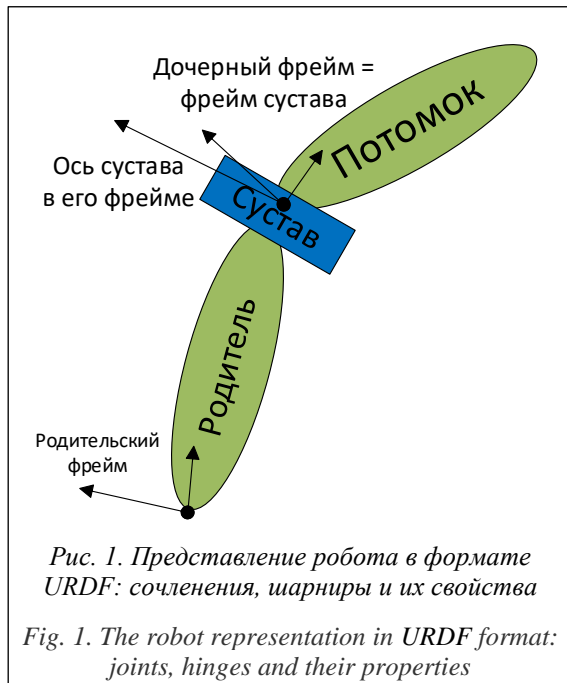
**Ключевые слова:** антропоморфные роботы, система управления, хождение, robot operating system, ROS\_Control, обратная кинематика.

Создание системы управления педипуляторами в целом является известной задачей. Наиболее важно для ее разработки правильно подобрать инструментарий и иметь техническую документацию от производителя робота. В случае с AP-601M документация была предоставлена НПО «Андройдная техника», также имелась возможность задавать уточняющие вопросы специалистам компании. Известно, что ПО для подобных систем управления уже не раз реализовалось, поэтому грамотным решением является использование готового свободно распространяемого ПО для взаимодействия с оборудованием, для решения задачи обратной кинематики, а также для визуализации процесса планирования движений. Одним из

таких инструментов является ROS – свободное ПО, работающее под управлением Linux Ubuntu разных версий и реализующее механизм взаимодействия разнородных программ через обмен сообщениями. Несомненным удобством является то, что ROS может работать на нескольких компьютерах и программы могут обнаруживать друг друга, находясь на разных устройствах. Кроме того, ROS обладает активно развивающимся и расширяющимся сообществом, что, во-первых, обеспечивает поддержку при работе с данной программной платформой, а во-вторых, позволяет использовать наработки других программистов, находящиеся в открытом доступе. ROS обладает качественной документацией. Для реализации

предложенной в статье системы управления ногами антропоморфного робота были доработаны пакеты ROS\_Control (низкоуровневое взаимодействие) и MoveIt! (планирование движений).

**Модель робота AP-601M в ROS.** Еще одним преимуществом ROS является удобный способ описания конструкции робота – формат Unified Robot Description Format (URDF). Согласно ему, робот составляется из сочленений и шарниров (рис. 1).



Сочленения описываются при помощи трехмерной модели в формате DAE или STL. Разделяют визуальную часть, используемую для отображения, и часть для определения столкновений. Шарниры описывают способ соединения сочленений. Указываются ось, вокруг которой будет производиться вращение, характер этого вращения (постоянный, в пределах заданного диапазона, вдоль одной оси), ограничения в виде минимального и максимального углов, моментов, скоростей и пр. [1].

**Построение модели в САПР SolidWorks.** Трехмерные модели сочленений робота были созданы в САПР SolidWorks как в наиболее качественном продукте для трехмерного моделирования в области машиностроения (для нее реализован программный модуль для экспорта модели в формат URDF – SolidWorks To URDF Exporter) [2].

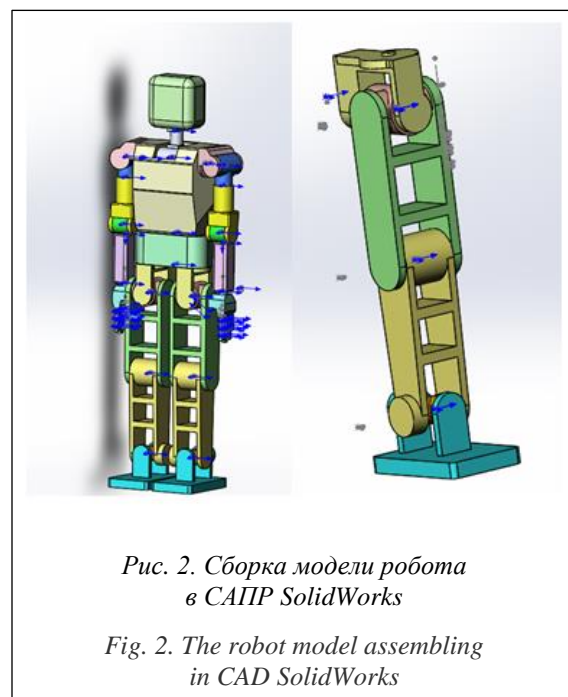
При создании модели сочленения необходимо задать единицы измерения в метрах и сле-

дить за расположением системы координат: Z – вверх, X – вперед. Данные требования связаны с тем, что программный пакет для визуализации RViz использует метры в качестве единицы измерения и создание модели, например в миллиметрах, может привести к неточностям. Направление осей Z и X выбрано в ROS как стандартное.

Модели сочленений создаются по отдельности и объединяются в сборку. В каждой модели необходимо создать локальную систему координат и указать ось, относительно которой будет вращаться последующее сочленение. Эти параметры в дальнейшем указываются в URDF Exporter для корректной работы. Также в модели можно создать цилиндрические выступы, которые позволят объединить модели в сборку и провести ось вращения.

Создаются две версии моделей сочленений: одна для визуального отображения (ее следует делать максимально качественной), другая – для расчета столкновений с объектами (должна быть максимально упрощенной). Поскольку алгоритм проверки на столкновения применяется к каждому треугольнику полигональной сетки, то, чем их будет меньше, тем быстрее выполнится работа. Результат построения модели в программе SolidWorks приведен на рисунке 2.

**Особенности экспорта в URDF при помощи плагина SolidWorks To URDF Exporter.** Программа SolidWorks To URDF Exporter не-



корректно создает пакет для системы ROS, поэтому в него необходимо внести ряд изменений:

- указать правильный путь до файла с URDF-описанием;
- изменить загрузку URDF-описания в launch-файле [3];
- в URDF-описание добавить глобальное сочленение, относительно которого будет считаться расположение всех остальных сочленений.

**Пакет ROS\_Control.** В роботе AP-600 установлен микроконтроллер STM32F437. Это базовый контроллер. Через интерфейс RS-485 он связан с микроконтроллерами STM32F103, расположенными около каждого мотора. Они выдают управляющее воздействие на мотор на основе сигнала обратной связи с инкрементного энкодера. Для контроля управляющего воздействия данный контроллер использует реализованный в нем ПИД-регулятор. Базовый контроллер может через протокол взаимодействия задать коэффициенты регулятора, минимальный и максимальный углы поворота, центровку и прочие параметры. Также базовый контроллер осуществляет контроль напряжений и токов по всем линиям питания (6, 8, 12 и 48 В).

Взаимодействие базового контроллера и управляющего компьютера осуществляется через интерфейс Ethernet (разработка НПО «Андронидная техника») посредством протокола, который работает поверх сетевого протокола UDP.

Согласно протоколу (см. таблицу), на базовый контроллер со стороны управляющего компьютера должна быть отправлена последовательность из 1 472 байтов. На каждый из моторов отведено 16 байтов. Каждый байт описывает определенный параметр.

Программа, осуществляющая взаимодействие с контроллером робота на управляющем компьютере, будет реализована на основе пакета ROS\_Control. Этот набор программ создан для обработки сырых данных, поступающих через низкоуровневые интерфейсы, и для передачи их другим узлам ROS в подготовленном для обработки виде. Данные программы реализованы потокобезопасно, а часть из них (контроллеры) могут быть заменены в процессе работы (это может понадобиться, если нужно перейти от управления по моменту к управлению по позиции) [4]. Схема ROS\_Control приведена на рисунке 3.

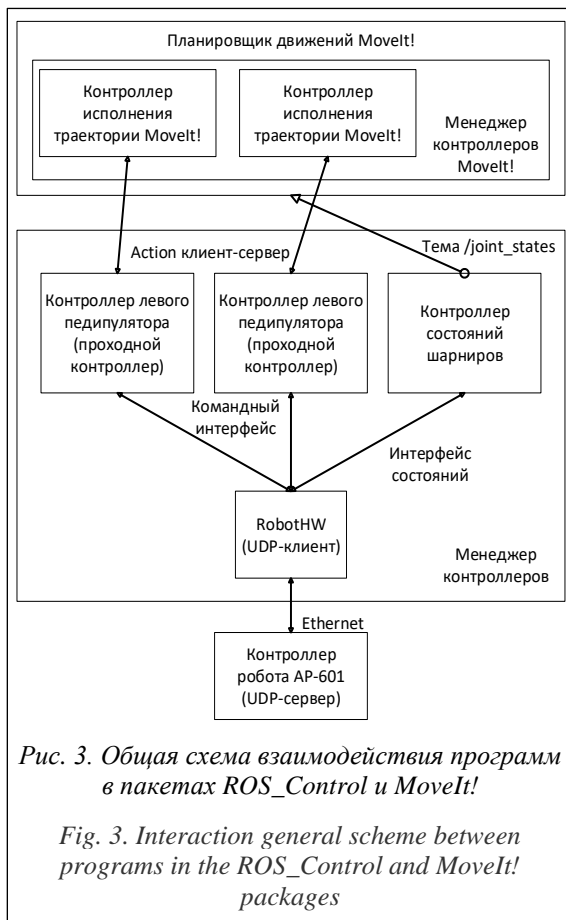
Непосредственно взаимодействие с контроллером робота осуществляет программа для аппаратного взаимодействия с роботом. В ней создается сокет для обмена сообщениями по протоколу UDP. Принятые сырые данные готовятся следующим образом: из 8-битного представления они преобразуются в 16-битные значения, затем в радианы (так как это базовая единица измерения угла в ROS) и наконец в традиционный вид из байтового представления напряжения и тока.

Программы, которые принимают уставку положения шарниров от узлов системы ROS, осуществляют регулирование управляющего

### Описание протокола обмена

#### The exchange protocol description

| № байта | Буфер приема                   | Буфер передачи                 |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0       | Номер мотора                   | Номер мотора                   |
| 1       | Статус                         | Вкл./Откл.                     |
| 2       | Текущая позиция (байт 1)       | Уставка позиции (байт 1)       |
| 3       | Текущая позиция (байт 2)       | Уставка позиции (байт 2)       |
| 4       | Напряжение (байт 1)            | Уставка коэф. Д (байт 1)       |
| 5       | Напряжение (байт 2)            | Уставка коэф. Д (байт 2)       |
| 6       | Сила тока (байт 1)             | Уставка центровки (байт 1)     |
| 7       | Сила тока (байт 2)             | Уставка центровки (байт 2)     |
| 8       | Козф. П (байт 1)               | Уставка коэф. П (байт 1)       |
| 9       | Козф. П (байт 2)               | Уставка коэф. П (байт 2)       |
| 10      | Козф. И (байт 1)               | Уставка коэф. И (байт 1)       |
| 11      | Козф. И (байт 2)               | Уставка коэф. И (байт 2)       |
| 12      | Текущая мин. позиция (байт 1)  | Уставка мин. позиции (байт 1)  |
| 13      | Текущая мин. позиция (байт 2)  | Уставка мин. позиции (байт 2)  |
| 14      | Текущая макс. позиция (байт 1) | Уставка макс. позиции (байт 1) |
| 15      | Текущая макс. позиция (байт 2) | Уставка макс. позиции (байт 2) |



воздействия, а также используются для передачи сигналов обратной связи от робота в систему ROS, называются контроллерами [5].

Контроллеры и программа для аппаратного взаимодействия с роботом связываются друг с другом при помощи интерфейсов, обмен данными происходит каждый квант времени, определенный с помощью параметра задержки.

Контроллеры и другие узлы системы ROS взаимодействуют между собой при помощи сервера действий [6]. Такой сервер позволяет отправлять на контроллер уставку и контролировать процесс ее достижения с помощью обратной связи.

Управление контроллерами (запуск, отключение, замену) осуществляет менеджер контроллеров [7].

Для передачи параметров робота в систему ROS был создан контроллер состояний шарниров.

Для передачи управляющего воздействия на шарниры манипулятора робота и его захватывающее устройство были созданы контроллер исполнения траектории манипулятора и контроллер захватывающего устройства.

### Конфигурация робота для MoveIt!

MoveIt! – это пакет в системе ROS, предназначенный для планирования движений. В его состав входят подпрограммы для решения задач прямой и обратной кинематики. MoveIt! имеет удобное API, которое можно использовать на языках C++ и Python. Также есть графический интерфейс для программы RViz [1].

В MoveIt! передаются точка в пространстве, которую нужно переместить в исполнительный элемент педипулятора, конфигурация педипулятора, текущие положения узлов и карта препятствий, позволяющая избежать соударений при движении. Данная программа рассчитывает траекторию, состоящую из последовательных положений шарниров, пройдя которую, манипулятор сможет достичь заданной точки.

Для получения более гладкой траектории полученные данные из программы MoveIt! интерполируют с помощью сплайнов. Это происходит в контроллере исполнения траектории.

Чтобы использовать программу MoveIt! для робота AP-601M, необходимо создать набор конфигурационных файлов. Автоматизировать этот процесс может программа MoveIt Setup Assistant [8].

В данную программу необходимо загрузить URDF-описание робота и выполнить следующие шаги конфигурации.

1. *Создание матриц коллизий.* Они показывают, какие сочленения при движении никогда не могут соприкоснуться друг с другом, например, предплечье и большой палец. Данная матрица позволяет не учитывать такие сочленения при планировании движений, тем самым ускоряя расчеты. Для заполнения матрицы генерируются от 10 до 100 тысяч произвольных позиций всех шарниров. Если сочленения ни разу не пересеклись, они помечаются меткой Never in collision.

2. *Создание групп планирования.* Сочленения и шарниры объединяются в группы планирования. Например, группа планирования педипулятора начинается от шарнира вращения бедра и заканчивается в стопе. Удобно задавать в этом случае группу планирования в виде кинематической цепи (последовательности сочленений). Для группы планирования выбирается программа-решатель задачи обратной кинематики. В текущей конфигурации робота выбраны две группы планирования: шарниры левой ноги, шарниры правой ноги.

3. *Создание начальных положений для групп планирования.* Это набор значений поло-



жений шарниров для некоторых стандартных положений робота. В данной конфигурации выбрано одно начальное положение, когда руки робота опущены вниз.

4. *Указание рабочей точки педипулятора.* Это конечная точка педипулятора, положение которой задается при планировании движений, как правило, последнее сочленение педипулятора – стопа.

Для осуществления взаимодействия с контроллерами робота необходимо создать контроллеры MoveIt!. Они являются клиентами действий [9] и получают данные из MoveIt!. Для управления контроллерами используется диспетчер контроллеров MoveIt!.

**Проведение калибровки.** Перед использованием манипулятора робота необходимо произвести установку минимальных и максимальных значений положений его шарниров, а также параметров ПИД-регулятора.

Предлагается следующий подход. При отключенном питании и установленной в 0 центровке мотора шарнир устанавливается в нулевое положение. Оно должно совпадать с нулевым положением модели. Центровка мотора устанавливается равной текущему значению положения мотора. Тогда после компиляции и повторного запуска управляющей программы текущее положение шарнира будет равно 0. Далее необходимо отвести шарнир в минимальное, а затем максимальное положение, запомнив в обоих случаях показания энкодеров. Полученные показания указываются в настройках шарниров. После этого выполняется перемещение шарнира в указанное положение в автоматическом режиме. Если у мотора, вращающего шарнир, не хватает мощности, необходимо увеличить коэффициент П регулятора. В случае перерегулирования или большого времени переходного процесса необходимо настроить коэффициенты И и Д.

Полученные в ходе калибровки минимальные и максимальные значения должны быть перенесены в URDF-описание робота.

Модель робота загружается в программу RViz [10], где визуально можно оценить совпадения движений реального робота и модели. Если шарнир вращается в противоположном направлении, то необходимо изменить знак в теge axis на противоположный.

**Испытания системы управления.** Антропоморфный робот AP-601M был подвешен на кране, к его бортовому компьютеру по интерфейсу Ethernet был подключен управляющий компьютер (рис. 4).



Рис. 4. Расположение робота на кране

Fig. 4. Location work on the crane

В ходе испытаний требовалось переместить педипуляторы робота в произвольное положение. Визуально сравнивалось положение педипуляторов на модели робота (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/5.jpg>) и у реального робота (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/6.jpg>).

Проверялась отказоустойчивость системы.

**Результаты.** В ходе испытаний системы управления педипулятором антропоморфного робота AP-601M было выявлено, что в целом система управления работает стабильно и перемещает педипуляторы в заданное положение.

Полученный результат следует признать удовлетворительным. В ходе работ было выявлено, что не хватает системы отображения данных о состоянии электродвигателей. Также необходимо доработать API MoveIt! путем написания обертки для того, чтобы в будущем ее было проще использовать исследователям.

**Заключение.** Была разработана система управления педипуляторами антропоморфного робота AP-601M с использованием программной платформы ROS. Система испытана и показала удовлетворительные результаты. Также были выявлены недостатки, которые планируется устранить.

Разработанная система управления может быть использована исследователями для взаимодействия с педипуляторами робота и про-

верки алгоритмов хождения. Планируется до-  
работать систему для поддержки инерциально-  
навигационного модуля, который при помощи

фильтров Калмана [11] или Маджвика [12] поз-  
волит получить углы ориентации робота в про-  
странстве.

### Литература

1. Joseph L. Mastering ROS for robotics programming. UK, Packt Publ., 2018, 552 с.
2. SolidWorks to URDF Exporter. Wiki.ros.org. URL: [http://wiki.ros.org/sw\\_urdf\\_exporter](http://wiki.ros.org/sw_urdf_exporter) (дата обращения: 02.12.2019).
3. Mahtani A., Sanchez L., Fernandez E., Martinez A. Effective robotics programming with ROS. UK, Packt Publ., 2016, 468 p.
4. Тарачков М.В., Ширкин А.Е., Перминов И.К., Письменный В.В., Мыльникова В.А. Разработка элементов системы управления антропоморфным роботом AR-601 // ГИСИС: матер. IV Всерос. конф. Калининград, 2018. С. 368–374.
5. Koubaa A. Robot operating system. The complete reference. Springer Publ., 2016, vol. 1, 720 p.
6. Description of packet Actionlib. Wiki.ros.org. URL: <http://wiki.ros.org/actionlib> (дата обращения: 02.12.2019).
7. Description of controller manager. Wiki.ros.org. URL: [http://wiki.ros.org/controller\\_manager](http://wiki.ros.org/controller_manager) (дата обращения: 02.12.2019).
8. MoveIt! setup assistant. Docs.ros.org. URL: [http://docs.ros.org/kinetic/api/moveit\\_tutorials/html/doc/setup\\_assistant/setup\\_assistant\\_tutorial.html](http://docs.ros.org/kinetic/api/moveit_tutorials/html/doc/setup_assistant/setup_assistant_tutorial.html) (дата обращения: 02.12.2019).
9. Simple action clients. WIKI.ROS.ORG. URL: [http://wiki.ros.org/actionlib\\_tutorials/Tutorials/SimpleActionClient](http://wiki.ros.org/actionlib_tutorials/Tutorials/SimpleActionClient) (дата обращения: 02.12.2019).
10. Visualization program RViz. WIKI.ROS.ORG. URL: <http://wiki.ros.org/rviz> (дата обращения: 02.12.2019).
11. Kalman filter. Habrahabr. URL: <https://habr.com/ru/post/166693/> (дата обращения: 02.12.2019).
12. Madjwick filter. Habrahabr. URL: <https://habr.com/ru/post/255661/> (дата обращения: 02.12.2019).

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.243-249

Received 13.12.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 243–249

## The pedipulator control system development for anthropomorphic robot AR-601M

*M.V. Tarachkov*<sup>1</sup>, Postgraduate Student, [mishklgpmi@mail.ru](mailto:mishklgpmi@mail.ru)

*O.V. Tolstel*<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, [tolstel.oleg@mail.ru](mailto:tolstel.oleg@mail.ru)

*A.L. Kalabin*<sup>2</sup>, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, [akalabin@yandex.ru](mailto:akalabin@yandex.ru)

<sup>1</sup> Baltic Federal University Immanuel Kant, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies, 236041, Kaliningrad, Russian Federation

<sup>2</sup> Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents the pedipulator control system implementation for the anthropomorphic robot AR-601M manufactured by NPO Android Technika LLC (Magnitogorsk, Russia). The proposed control system consists of a driver that provides interaction between the on-board computer and the robot main microcontroller, and a control program that solves the inverse kinematic problem and allows planning the each pedipulator movements to a given point. The control program also has a graphical interface for displaying a three-dimensional model of the robot in space.

To build this pedipulator control system, we used the freely distributed software platform Robot Operating System (ROS) and, in particular, ROS Control packages for implementing low-level interaction, MoveIt! for planning movements, RViz for visualization. Therefore, you must use the Linux Ubuntu 16.04 operating system. A program set for controlling pedipulators is in the C++ programming language. The programming language choice of is due to the fact that to solve this problem, you need the best performance and a commensurate amount of cost for writing code. For the C++ language, there is an ASIO input/output library that helps you interact with the robot controller.

There are the experiment results on the proposed control system usage for the anthropomorphic robot AR-601M pedipulators, as well as possible options for using the program described in the paper.

The developed control system for pedipulators creates an abstraction level between hardware and software, which allows researchers to concentrate on solving the walking problem. In addition, the program has a convenient graphical visualizer.

The paper considers the program updating possibility to use an inertial measurement module in its composition, which will allow obtaining data on the accelerations and angular velocities of the robot, and after applying the Kalman or Majvik filter to them, the orientation angles in space.

**Keywords:** anthropomorphic robots, control system, walking, robot operating system, ROS\_Control, inverse kinematics.

### References

1. Joseph L. *Mastering ROS for Robotics Programming*. UK, Packt Publ., 2018, 552 p.
2. *SolidWorks to URDF Exporter*. *Wiki.ros.org*. Available at: [http://wiki.ros.org/sw\\_urdf\\_exporter](http://wiki.ros.org/sw_urdf_exporter) (accessed December 02, 2019).
3. Mahtani A., Sanchez L., Fernandez E., Martinez A. *Effective Robotics Programming with ROS*. UK, Packt Publ., 2016, 468 p.
4. Tarachkov M.V., Shirkin A.E., Perminov I.K., Pismenny V.V., Mylnikova V.A. Development of elements of the control system anthropomorphic robot AR-601. *Proc. GISIS Conf.*, Kaliningrad, 2018, pp. 368–374 (in Russ.).
5. Koubaa A. *Robot Operating System. The Complete Reference*. Springer Publ., 2016, vol. 1, 720 p.
6. *Description of Packet Actionlib*. *Wiki.ros.org*. Available at: <http://wiki.ros.org/actionlib> (accessed December 02, 2019).
7. *Description of Controller Manager*. *Wiki.ros.org*. Available at: [http://wiki.ros.org/controller\\_manager](http://wiki.ros.org/controller_manager) (accessed December 02, 2019).
8. *MoveIt Setup Assistant*. *Docs.ros.org*. Available at: [http://docs.ros.org/kinetic/api/moveit\\_tutorials/html/doc/setup\\_assistant/setup\\_assistant\\_tutorial.html](http://docs.ros.org/kinetic/api/moveit_tutorials/html/doc/setup_assistant/setup_assistant_tutorial.html) (accessed December 02, 2019).
9. *Simple Action Clients*. *WIKI.ROS.ORG*. Available at: [http://wiki.ros.org/actionlib\\_tutorials/Tutorials/SimpleActionClient](http://wiki.ros.org/actionlib_tutorials/Tutorials/SimpleActionClient) (accessed December 02, 2019).
10. *Visualization Program RViz*. *WIKI.ROS.ORG*. Available at: <http://wiki.ros.org/rviz> (accessed December 02, 2019).
11. *Kalman Filter*. *Habrahabr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/166693/> (accessed December 02, 2019).
12. *Madjwick Filter*. *Habrahabr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/255661/> (accessed December 02, 2019).

### Для цитирования

Тарачков М.В., Толстель О.В., Калабин А.А. Разработка системы управления педипуляторами антропоморфного робота АР-601М // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 243–249. DOI: 10.15827/0236-235X.130.243-249.

### For citation

Tarachkov M.V., Tolstel O.V., Kalabin A.L. The pedipulator control system development for anthropomorphic robot AR-601M. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 243–249 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.243-249.

УДК 519.711.3+ 622.691.4  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.250-256

Дата подачи статьи: 19.03.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 250–256

## **Система поддержки принятия решений по управлению рисками опасных ситуаций в сложных системах газоснабжения**

*Р.Р. Кантюков*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, зам. генерального директора по науке,  
*R\_Kantuykov@vniigaz.gazprom.ru*

*О.Б. Бутусов*<sup>2,3</sup>, д.ф.-м.н., профессор, *butusov-1@mail.ru*

*В.П. Мешалкин*<sup>2,4</sup>, д.т.н., академик РАН, профессор, зав. кафедрой,  
*vpmeshalkin@gmail.com*

*В.М. Панарин*<sup>5</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, *panarin-tsu@yandex.ru*

<sup>1</sup> НИИ природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ,  
пос. Развилка, 142717, Россия

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
г. Москва, 125047, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный социальный университет, г. Москва, 129226, Россия

<sup>4</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
г. Москва, 119991, Россия

<sup>5</sup> Тульский государственный университет, г. Тула, 300012, Россия

Разработаны архитектура и программно-информационное обеспечение системы поддержки принятия решений по анализу и снижению рисков аварийных ситуаций в сложных системах газоснабжения и по уменьшению воздействия аварийных ситуаций на лесные массивы.

Для выработки рациональных решений в системах поддержки принятия решений используются специальные блоки расчета показателей технологических и экологических рисков. Расчет показателей экологических рисков осуществляется по оценкам воздействия на лесные массивы аварийных ситуаций в сложных системах газоснабжения. При разработке ПО системы поддержки принятия решений проведена детальная классификация возможных аварийных ситуаций в сложных системах газоснабжения и разработаны процедуры принятия соответствующих научно-обоснованных решений системы поддержки принятия решений по ликвидации опасных ситуаций. При разработке алгоритмического и программно-информационного обеспечения системы впервые введен ряд новых показателей безопасности сложных систем газоснабжения.

В качестве основных показателей рисков использованы техногенные риски (промышленный, экологический, социальный) возникновения опасных (аварийных) ситуаций на сложных системах газоснабжения. Риски позволяют оценить возможный ущерб природной среде в случае возникновения аварийных ситуаций в сложных системах газоснабжения. Для оценки экологического ущерба, нанесенного лесным массивам аварийными ситуациями, на сложных системах газоснабжения предложено использовать сегментацию спутниковых изображений территории с помощью методов кластерного анализа. При этом компьютерное моделирование атмосферного переноса газовых выбросов, биогеоэкологические БД и зависимости «доза–эффект» позволяют непосредственно определять интегральные показатели ущерба лесным массивам по величине дозы.

При разработке ПО использованы Microsoft Visual Studio (языки программирования Си++ и Си-шарп), пакет компьютерной математики Матлаб, а также БД и современные средства информационно-компьютерных технологий.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, программно-информационное обеспечение, сложные системы газоснабжения, лесные массивы, аварийные и опасные ситуации, техногенные и экологические риски, эколого-экономическая оптимизация, зависимость «доза–эффект».

Одной из важных задач функционирования сложных систем газоснабжения (ССГ) является минимизация рисков аварийных ситуаций. Для решения этой задачи при эксплуатации ССГ необходимо учитывать и прогнозировать

возможное возникновение и развитие опасных и чрезвычайных ситуаций (ЧС) на объектах ССГ [1–4]. В результате проведенных исследований по анализу и классификации опасных ситуаций в ССГ [5] разработано алгоритмическое

обеспечение системы поддержки принятия решений (СППР) для прогнозирования и управления рисками опасных ситуаций в ССГ и принятия решений по уменьшению опасности возникновения ЧС. Архитектура и режимы функционирования СППР разработаны на основе методологии системного подхода в химической технологии, методов логистики ресурсосбережения и теории риска. Важнейшими компонентами алгоритмического и программно-информационного обеспечения СППР являются блоки оперативного анализа режимов функционирования объектов ССГ [5], реализующие три процедуры: предварительный качественный анализ опасностей, выявление последовательностей опасных ситуаций, прогнозирование последствий опасных ситуаций и

расчет значений промышленного и экологического рисков.

Архитектура СППР представлена на рисунке 1. Основу архитектуры составляют три группы модулей: группа модулей БД, группа модулей управления, оценки рисков и принятия решений, группа модулей анализа спутниковой информации. ПО разработано с помощью Microsoft Visual Studio и пакета компьютерной математики Матлаб.

**Алгоритмическое и программное обеспечение СППР по расчету показателей надежности ССГ**

Математическое обеспечение включает следующие алгоритмы обеспечения надежности

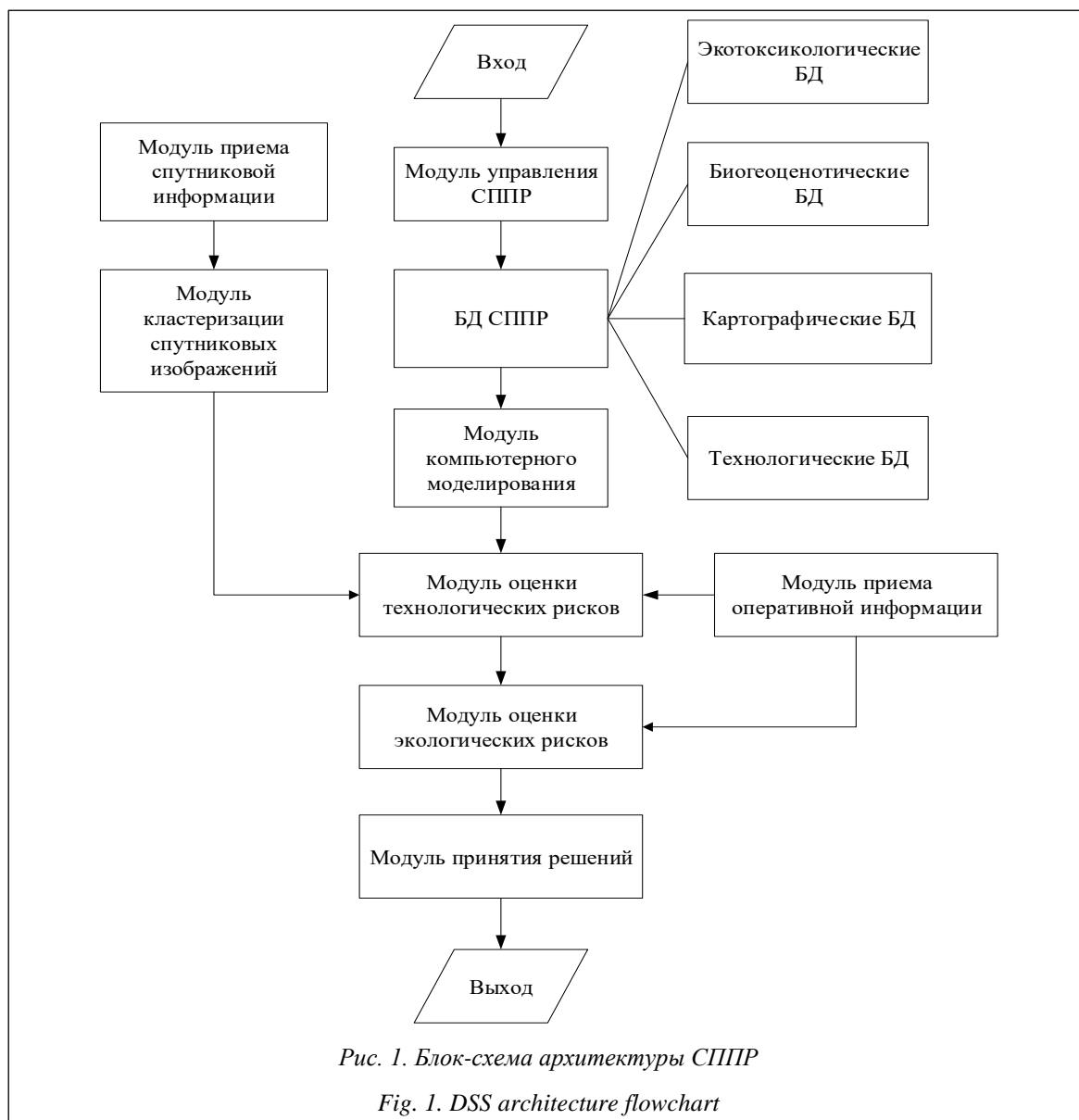


Рис. 1. Блок-схема архитектуры СППР

Fig. 1. DSS architecture flowchart

ССГ: алгоритмы обеспечения надежности технических коридоров магистральных газопроводов, входящих в структуру ССГ; алгоритмы расчета кольцевых структур ССГ для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей; алгоритмы планирования, модернизации и оптимизации структуры трубопроводов ССГ на основе требуемых показателей надежности [1, 2].

ПО СППР состоит из укрупненных блоков (модулей) [1, 2].

1. Блок расчета показателей надежности проектируемых объектов ССГ, реализующий:

- выбор оптимальных технологических решений по управлению процессами транспорта газа;
- расчет основных инженерно-технических параметров ССГ;
- выбор направления трассы газопровода и ее месторасположения на территории;
- выбор материалов, типоразмеров оборудования и его изготовителей (марка стали, наличие и качество внешнего и внутреннего покрытия труб, конструкция и качество изготовления оборудования на компрессорных станциях, станциях охлаждения газа, *газораспределительных станциях* (ГРС) и других объектах газопровода);
- выбор системы *электрохимической защиты* (ЭХЗ) для ССГ в системе ЭХЗ.

2. Блок выбора рациональных схемно-структурных конструкций ССГ, а именно:

- технологических схем объектов (компрессорных и газораспределительных станций);
- вида сопряжения проектируемого нового объекта с действующей ССГ для маневрирования потоками, управления запасами газа;
- вида резервирования оборудования ССГ;
- видов обеспечения резервов производственной мощности и их распределения по объектам ССГ;
- средств автоматизации и информатизации проектируемой ССГ по видам диагностического оборудования и измерительной аппаратуры;
- видов диагностического обслуживания объектов ССГ.

3. Блок выбора типа конструкций оборудования ССГ, стратегии организации технического обслуживания и ремонтов оборудования.

4. Блок выбора конструкции подземных хранилищ газа и их размещения.

5. Блок определения оптимальных резервов производственной мощности газопроводов и резервов производственных мощностей многониточного коридора для определения режимов транспортировки, хранения и распределения газа в ССГ.

В архитектуру разработанной СППР входит блок, программно реализующий алгоритм расчета показателей безопасности ССГ по представительной статистической информации и алгоритмы обеспечения показателей безопасности при проектировании, организации строительства и эксплуатации энергоресурсоэффективных развивающихся ССГ.

В архитектуру СППР также входят блоки, реализующие алгоритмы принятия решений по обеспечению безопасности действующих систем газоснабжения [1, 2], а именно:

- алгоритм сопоставления (ранжирования) отдельных объектов ССГ на основе использования интегральных показателей техногенного риска;
- алгоритм планирования стратегии технического обслуживания и предупредительных ремонтов оборудования (ежегодное и среднесрочное), распределения средств на ремонты между объектами или подразделениями одного предприятия как при эксплуатации, так и при реконструкции ССГ;
- алгоритмы расчета эксплуатационных затрат, а также сумм технологического и экологического страхования на основе использования показателей промышленного и экологического рисков;
- алгоритмы разработки научно-обоснованных организационно-технических мероприятий по повышению безопасности ССГ на основе использования показателей риска;
- алгоритмы выявления наиболее опасных узких мест ССГ и их учета при разработке мероприятий по техническому и экологическому мониторингу ССГ.

#### **Алгоритмическое обеспечение методов оценки воздействия ССГ на лесные массивы**

В архитектуру разработанной СППР входит алгоритмическое и программное обеспечение методов оценки воздействия ССГ на *лесные массивы* (ЛМ) [6–8]. Разработанные алгоритмы оценки основаны на теории «доза–эффект»-зависимостей применительно к ЛМ [9]. В теории «доза–эффект»-зависимостей к параметрам эффекта относятся экстенсивные (запас

древесины, наземная фитомасса) и структурные (видовое разнообразие) характеристики ЛМ. К параметрам дозы относятся показатели техногенного воздействия. Одним из важных показателей эффекта для ЛМ является видовое разнообразие. Этот показатель может быть использован как интегральный индекс для оценки экологического ущерба, нанесенного техногенными воздействиями на ЛМ объектов ССГ. Оценка видового разнообразия рассчитывается по формуле

$$E_c = -\sum_{i=1}^I \log(N_i / N), \tag{1}$$

где  $E_c$  – экологическая ценность ЛМ;  $N_i$  – число объектов  $i$ -го класса;  $N$  – общее число объектов в экосистеме ЛМ.

На рисунке 2 представлен двудольный информационный граф расчета зависимостей эколого-техногенного взаимодействия объектов ССГ и компонентов ЛМ в виде двудольного графа, а на рисунке 3 – блок-схема классифика-

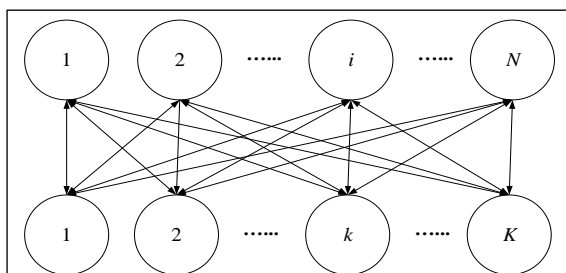


Рис. 2. Двудольный информационный граф эколого-техногенного взаимодействия объектов ССГ и ЛМ:  $i$  нумерует компоненты лесной экосистемы,  $k$  нумерует объекты ССГ

Fig. 2. The bipartite information graph of the ecological and technogenic objects interaction:  $i$  numbers the forest ecosystem components,  $k$  numbers the technogenic objects

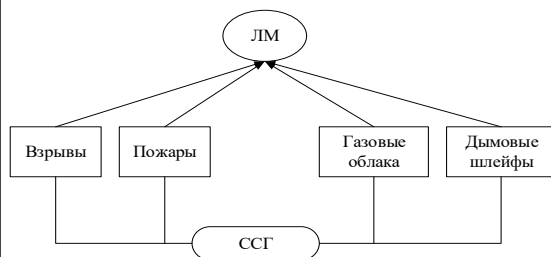


Рис. 3. Блок-схема классификации основных видов воздействия аварийных ситуаций ССГ на ЛМ

Fig. 3. The classification flowchart of the technogenic impacts main types on forest stands

ции основных видов воздействия аварийных ситуаций ССГ на состояние ЛМ [9].

Для расчета степени воздействия объектов ССГ на ЛМ в СППР использована система интегральных индексов экологического состояния ЛМ:

$$\rho_{ii} = \frac{\sum d_{ij}(\Delta B_j)_F}{\sum d_{ij} \Delta B_j} \frac{\sum d_{ij} B_j}{\sum d_{ij} (B_j)_F}, \tag{2}$$

где  $\rho_{ii}$  – интегральный индекс для  $i$ -го участка ЛМ;  $B_j$  – измеряемые параметры экологического состояния ЛМ;  $d_{ij}$  – численные коэффициенты разложения измеряемых параметров на внутреннем базисе; индекс  $F$  – фоновое или максимальное значение параметра.

Для оценки воздействия на ЛМ объектов ССГ в СППР также используется блок, реализующий алгоритм относительных площадных оценок экологического ущерба:

$$D = \frac{1}{S} \iint_S \left( 1 - \frac{1}{k} \sum_k E_k(x, y) \right) dS, \tag{3}$$

где  $S$  – площадь ЛМ;  $E_k(x, y) = I_k(C(x, y))$  – «доза-эффект»-зависимость для  $k$ -го интегрального индекса;  $C(x, y)$  – доза [9].

### Режимы функционирования СППР

Представленная СППР функционирует в четырех режимах [7, 8].

1. Предварительный качественный анализ опасностей, способных превратиться в техногенные аварии и ЧС, для чего производится классификация инженерных объектов ССГ как техногенно-опасных систем. При обследовании инженерных объектов необходимо собрать и проанализировать достаточно большой объем технической информации.

2. Выявление и описание основных опасностей каждого из инженерных объектов. На этом этапе зафиксированные опасности «привязываются» к составным частям (элементам) объекта или операциям, к которым они имеют отношение.

3. Отбор происшествий (событий). Отбор происшествий завершают составлением сценариев развития аварий, отобранных для последующего анализа риска. Сценарии представляют описание развития последовательности событий от потенциальных опасностей до реализации инцидента.

4. Анализ последствий опасных ситуаций на основе: расчета количественных характеристик утечек природного газа, токсичных веществ и выделяемой энергии для каждого сценария развития аварии; расчета характеристик

эмиссии токсичных веществ в окружающую среду; расчета распространения ударной волны или фронта пожара, которые ведут к человеческим жертвам; оценки воздействия на здоровье людей, повреждений материальных ценностей и ущерба лесным массивам; оценки техногенного риска объекта.

Для анализа последствий опасных ситуаций в СППР используются блок математического моделирования для моделирования различных инцидентов, например, разгерметизации обору́дования, а также математические модели эмиссии химических веществ в окружающую среду.

В СППР программная реализация алгоритма расчета экологического риска осуществляется на основе оценки техногенных воздействий на ЛМ [9]. Экологический риск с учетом ущербов, нанесенных ЛМ, рассчитывается с помощью интегрального коэффициента сохранности ЛМ по следующей формуле:

$$R = \iint_G \int_0^{C_{\max}} (1 - I(x, y)) P(C_0(x, y)) dx dy dC_0, \quad (4)$$

где  $I(x, y)$  – площадное распределение интегрального коэффициента сохранности;  $P(C_0(x, y))$  – плотность вероятности распределения по территории ЛМ воздействий аварий в ССГ с различными значениями начальных концентраций аварийных газов.

Для оценки пространственного распределения концентрации вредных веществ по территории ЛМ в СППР используется полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии. В инженерных расчетах для оценки скорости распространения аварийных облаков применяется стандартная методика РД 52.04.253-90, в которой учитывают три класса устойчивости атмосферы.

Системный анализ рисков завершается в СППР прогнозированием и расчетом оценок аварийно-техногенного риска.

### Заключение

Оценка воздействия на ЛМ ССГ в виде техногенных рисков является сложной комплексной проблемой. Для ее решения разработана специальная СППР по управлению рисками опасных ситуаций в ССГ.

Для оценки экологического ущерба, нанесенного ЛМ аварийными ситуациями, на ССГ предложено использовать сегментацию спутниковых изображений территории с помощью методов кластерного анализа. При этом компьютерное моделирование атмосферного переноса газовых выбросов, биогеоценотические БД и зависимости «доза–эффект» позволяют непосредственно определять интегральные показатели ущерба ЛМ по величине дозы.

### Литература

1. Кантюков Р.А., Кантюков Р.Р., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н. Проблемы безопасности трубопроводов // Газовая промышленность. 2012. № 6. С. 79–83.
2. Кантюков Р.А., Кантюков Р.Р., Хадиев М.Б., Хамидуллин И.В., Максимов В.А. Компрессоры в технологических процессах. Газораспределительные, компрессорные станции магистральных газопроводов и автомобильные газонаполнительные станции. Казань: Изд-во КФУ, 2014. 647 с.
3. Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Модели надежности газоснабжающих систем // Автоматика и телемеханика. 2010. № 7. С. 149–159. DOI: 10.1134/S0005117910070155.
4. Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Состояние и проблемы надежности единой и региональных систем газоснабжения // Изв. РАН. 2009. № 5. С. 34–40.
5. Сухарев М.Г., Калинина Э.В., Лапига А.Г. Статистический анализ аварийности газораспределительных систем // Территория НЕФТЕГАЗ. 2010. № 4. С. 16–19.
6. González H.A., De La Cruz J.M., De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. Applied Mathematical Modeling, 2009, vol. 33, iss. 3, pp. 1584–1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.02.012.
7. Ramachandra T.V., Krishna S.V., Shruthi B.V. Decision support system for regional domestic energy planning. J. of Sci. Ind. Res., 2005, vol. 64, pp. 163–174. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/8242/b159a43fe7cd4871c1f065cef94356314613.pdf> (дата обращения: 15.03.2020).
8. Djebedjiana B., El-Naggara M., Shahin I. Optimal decision of gas distribution network: A case study, MEJ, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 35–51.
9. Гриценко А.И., Акопова Г.С., Максимов В.М. Экология. Нефть и газ. М.: Наука, 1997. 598 с.



## Decision support system for risk management of dangerous situations in complex gas supply systems

**R.R. Kantyukov**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General for Science,  
R\_Kantyukov@vniigaz.gazprom.ru

**O.B. Butusov**<sup>2,3</sup>, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, butusov-1@mail.ru

**V.P. Meshalkin**<sup>2,4</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Academician of the RAS, Professor, Head of the Department,  
vpmeshalkin@gmail.com

**V.M. Panarin**<sup>5</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, panarin-tsu@yandex.ru

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies – VNIIGAZ,  
Razvilka vil., 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation

<sup>3</sup> Russian State Social University, Moscow, 129226, Russian Federation

<sup>4</sup> Kurnakov Institute of General and Neorganic Chemistry of RAS, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>5</sup> Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation

**Abstract.** The authors developed an architecture, software and decision support system (DSS) for analyzing and emergency risk reduction in complex gas supply systems (CGSS) and for reducing the impact on forest areas.

They use special modules for calculating technological and environmental risks in order to produce decisions in DSS. The ecological damage calculation is based on assessing the impact on the forest areas by the emergency situations in the CGSS. During the development of the DSS software, there was a detailed classification of possible emergency situations in the CGSS, as well as special procedures developed to produce appropriate system decisions for the dangerous situation control. When developing algorithmic and software for DSS, the authors introduced a number of new CGSS safety indicators for the first time.

Technogenic risks (industrial, environmental, social) of the dangerous (emergency) situations on the CGSS were taken as the main risk indicators. Risks make it possible to assess probable environmental damage in case of emergencies in the CGSS. The paper proposes to use segmentation of forest satellite images to assess the environmental damage caused by accidents in the CGSS. At the same time, computer modeling of atmospheric transport for gas emissions, biogeocenotic databases, and the "exposure-response" dependencies make it possible to determine the total damage to forests by the values of the exposure directly.

While developing DSS software, the authors used Microsoft Visual Studio (C++ and C-sharp programming languages), Matlab package, as well as databases and modern means of information and computer technologies.

**Keywords:** decision support system, software and information support, databases, complex gas supply systems, forests, emergency situations, industrial and environmental risks, exposure-response function.

### References

1. Kantyukov R.A., Kantyukov R.R., Yakupov N.M., Tameev I.M., Yakupov S.N. Pipe safety problems. *Gas Industry Magazine*, 2012, no. 6, pp. 79–83 (in Russ.).
2. Kantyukov R.A., Kantyukov R.R., Khadiev M.B., Khamidullin I.V., Maksimov V.A. *Compressors in Technological Processes. Gas Distribution, Compressor Stations of Gas Pipelines and Gas Filling Stations*. Kazan, KSU Publ., 2014, 647 p. (in Russ.).
3. Sukharev M.G., Karasevich A.M. Reliability models for gas supply systems. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 7, pp. 149–159. DOI: 10.1134/S0005117910070155 (in Russ.).
4. Sukharev M.G., Karasevich A.M. State of the art and problems of reliability of unified and regional gas supply systems. *Bull. of the RAS*, 2009, no. 5, pp. 34–40 (in Russ.).
5. Sukharev M.G., Kalinina E.V., Lapiga A.G. Statistical analysis of the accident rate of gas distribution systems. *Territory of NEFTEGAZ*, 2010, no. 4, pp. 16–19 (in Russ.).
6. González H.A., De La Cruz J.M., De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, vol. 33, iss. 3, pp. 1584–1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.02.012.
7. Ramachandra T.V., Krishna S.V., Shruthi B.V. Decision support system for regional domestic energy planning. *J. of Sci. Ind. Res.*, 2005, vol. 64, pp. 163–174. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/8242/b159a43fe7cd4871c1f065cef94356314613.pdf> (accessed March 15, 2020).

8. Djebedjiana B., El-Naggara M., Shahin I. Optimal decision of gas distribution network: A case study. *MEJ*, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 35–51.
9. Gritsenko A.I., Akopova G.S., Maksimov V.M. *Ecology. Oil and Gas*. Moscow, Nauka, 1997, 598 p.

#### Для цитирования

Кантюков Р.Р., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П., Панарин В.М. Система поддержки принятия решений по управлению рисками опасных ситуаций в сложных системах газоснабжения // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 250–256. DOI: 10.15827/0236-235X.130.250-256.

#### For citation

Kantyukov R.R., Butusov O.B., Meshalkin V.P., Panarin V.M. Decision support system for risk management of dangerous situations in complex gas supply systems. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 250–256 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.250-256.

УДК 004.021  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.257-265

Дата подачи статьи: 27.01.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 257–265

## **Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров**

*И.О. Шепель*<sup>1,2</sup>, инженер-исследователь, аспирант, [info@ictis.sfedu.ru](mailto:info@ictis.sfedu.ru)

<sup>1</sup> Научно-конструкторское бюро вычислительных систем,  
г. Таганрог, 347936, Россия

<sup>2</sup> Институт компьютерных технологий и информационной безопасности  
Южного федерального университета, г. Таганрог, 347922, Россия

В работе рассматривается проблема построения модели проходимости окружающего пространства по данным от нескольких сенсоров, установленных на роботизированной платформе. Эта проблема является ключевой для решения задачи автономного движения без использования какой-либо априорной информации о среде. Применение нескольких сенсоров обусловлено физическими ограничениями датчиков и необходимостью уменьшить размер слепых зон вокруг автономных роботизированных платформ. Целью работы является качественное улучшение алгоритма синтеза карты окружающего пространства путем добавления возможности обработки данных от нескольких независимых источников данных с их последующим комплексированием.

В статье представлен алгоритм построения карты занятости для системы технического зрения, состоящей из нескольких разнесенных в пространстве лидаров. Предложен подход к объединению данных от различных сенсоров без требования аппаратной синхронизации данных. Такое объединение происходит на алгоритмическом уровне и не накладывает ограничений на количество сенсоров или на физическую природу их данных. Оно позволяет обрабатывать облака точек от сенсоров независимо друг от друга, тем самым уменьшая вычислительную сложность по сравнению с обработкой объединенного облака точек. Кроме того, представлено дополнение алгоритма трассировки лучей, которое учитывает размещение нескольких лидаров на роботизированной платформе и объединяет поля зрения этих датчиков, что позволяет получить более полную модель проходимости окружающей среды. Описанный модифицированный алгоритм построения адаптивного буфера безопасности вокруг препятствий на карте занятости дает возможность планировать траекторию на равном удалении от объектов в сложных сценариях.

**Ключевые слова:** карта занятости, лидар, облако точек, комплексирование данных, обнаружение препятствий, автономное движение.

В настоящее время развитие вычислительной техники, а также распространение множества роботизированных мобильных платформ сделали возможным промышленное использование роботов для решения целого ряда задач. При этом одним из важных требований к подобным системам является способность автономно двигаться, планируя траекторию движения и избегая препятствий без вмешательства оператора.

Существует несколько наиболее распространенных подходов к нахождению препятствий по данным сенсоров технического зрения. В представленном исследовании в качестве основного сенсора используются лидары, позволяющие измерять расстояния до удаленных объектов окружающей среды с помощью лазерного излучения. Одним из подходов для решения задачи детектирования препятствий является построение карт занятости [1]. Карта занятости – это модель проходимости окружа-

ющей среды, представленная в виде дискретной решетки, каждая из ячеек которой помечена как препятствие, свободная или ячейка с неизвестной проходимостью. Подобные карты могут строиться по данным от различных сенсоров, таких как радары, стереокамеры и лидары. Имеется множество различных надстроек над представленным в работе [1] базовым алгоритмом синтеза карты проходимости. Эти надстройки позволяют выделять нависающие структуры (например, перекрытия мостов, ветви деревьев, навесы, под которыми можно свободно перемещаться) [2], варьировать размер одиночной ячейки карты для более точного определения границ препятствий [3], строить ограничивающие параллелепипеды объектов [4] и т.д. Однако в этих работах не рассматриваются конструктивные ограничения, накладываемые установкой сенсоров на *роботизированную платформу* (РП). При этом даже самые современные лидары обладают доста-

точно низким вертикальным разрешением, и поле зрения датчика сильно зависит от способа его установки. Так, с помощью пересечения сканирующих плоскостей двух лидаров авторы [5] решают сложную задачу нахождения отрицательных препятствий – ям, оврагов, крутых склонов и т.п.

В данной работе предлагается подход к решению проблемы комплексирования информации от различных сенсоров технического зрения и построения общей модели окружающего РП мира. В основу алгоритма, описанного далее, взят алгоритм из [6]. В статье также представлены дополнения к этому алгоритму, позволяющие учитывать расположение лидара на платформе и его поле зрения при трассировке лучей. Кроме того, карта занятости структурно разделена на единовременную, которая строится по каждому новому сообщению с данными от сенсора (в данном случае по облаку точек от лидара), и на накапливаемую, объединяющую данные от этих единовременных карт. Каждая единовременная карта получает данные от различных сенсоров, благодаря чему комплексирование данных происходит на уровне этих карт занятости, а не облаков точек.

**Алгоритм построения карты занятости по данным от лидара**

Упрощенная схема алгоритма представлена на рисунке 1.

На вход алгоритма подается массив с трехмерными координатами точек в метрах (так называемое облако точек). Этот массив генерируется сенсором, в данном случае лидаром. Затем происходит генерация единовременной карты проходимости:

- все окружающее РП пространство разделяется на квадратные ячейки одинакового размера;

- трехмерные координаты точек облака распределяются в соответствующие им двумерные ячейки (при распределении не используется вертикальная координата);

- в каждой ячейке принимается решение о наличии в ней препятствия;

- на двумерной карте с отмеченными препятствиями и известным положением лидара производится трассировка его лучей; все ячейки в порядке распространения луча до первого препятствия помечаются как свободные от препятствий, а после – как ячейки с неизвестным типом.

При этом дискретная двумерная решетка неподвижна относительно поверхности Земли, а платформа свободно перемещается по ней. Решетка описывается следующим набором параметров: ширина, длина и разрешение – длина стороны квадратной ячейки. Так как синтез модели проходимости должен происходить в реальном масштабе времени, объем памяти для хранения карты должен быть жестко ограничен. Поэтому используется механизм так называемых сворачиваемых карт [7]. Эта модель в памяти компьютера реализуется как тор, в то время как в реальном мире земная поверхность замещается картой (рис. 2), то есть верхняя граница карты совпадает с нижней, а граница слева – с границей справа. Для определения ячейки, в которую попадает точка, используется следующая формула:

$$map \left\| \left\| \frac{rem\left(\frac{x}{W}\right)}{dx} \right\| \left\| \frac{rem\left(\frac{y}{H}\right)}{dy} \right\| \right\| = cell(x, y), \quad (1)$$

где *rem* – операция деления по модулю; *cell*(*x*, *y*) – ячейка карты, соответствующая точке с координатами *x*, *y*; *W*, *H* – соответственно ширина и высота карты; *dx*, *dy* – размеры ячейки по ширине и высоте; *map* – карта

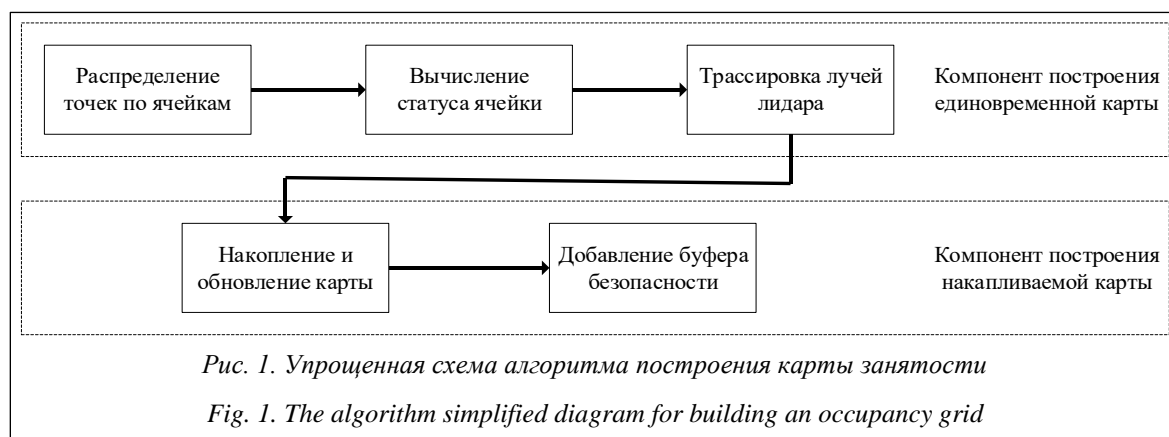


Рис. 1. Упрощенная схема алгоритма построения карты занятости

Fig. 1. The algorithm simplified diagram for building an occupancy grid

занятости. Для удобства и простоты представления и карта, и ячейки в ней квадратные. Размер стороны ячейки характеризует разрешающую способность карты. Так, препятствия с площадью проекции на поверхность Земли, меньшей площади одной ячейки, также будут занимать на карте занятости всю ячейку целиком. Для городской и сельской местности авторы [6] выбрали длину ячейки, равную 0,2 м. Размер самой карты выбирается исходя из физических ограничений самого датчика и размера ячейки так, чтобы хотя бы одна точка попадала в ячейку.

Из-за периодической структуры карты не существует взаимно-однозначного соответствия между координатами ячеек решетки и координатами РП: при движении платформа будет циклически перемещаться по одним и тем же ячейкам. Поэтому вокруг РП выделяется область интереса, которая перемещается вместе с платформой (рис. 2). При этом ячейки, о проходимости которых принимается решение в текущий момент и на которых затем будет строиться траектория движения, находятся только внутри этой области. В процессе движения РП некоторые ячейки выходят из области интереса и данные, находящиеся в них, удаляются из карты. Чтобы область интереса при движении не пересекалась сама с собой, то есть не ссылалась дважды на одну и ту же ячейку сворачиваемой карты, ее размер выбирается исходя из неравенства  $l_{roi} < H/\sqrt{2}$ , где  $l_{roi}$  – длина стороны области интереса;  $H$  – длина кратчайшей стороны сворачиваемой карты. Центр обновляемой области интереса совпадает с положением

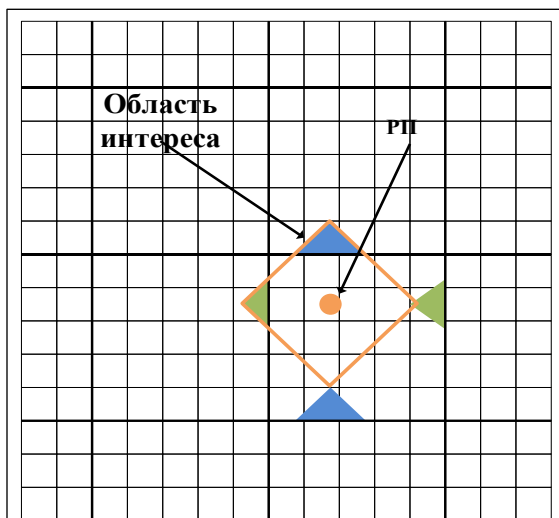


Рис. 2. Модель сворачиваемой карты

Fig. 2. The wrappable map model

платформы, и при ее движении эта область перемещается по карте вместе с платформой.

После распределения точек в каждой ячейке вычисляется ее статус – занята она препятствием или свободна [6]. Для этого проверяются следующие условия:

– наличие положительных препятствий

$$N > 1 \& p_z^N - p_z^1 \geq \tau_b, \tag{2}$$

– наличие нависающих препятствий

$$\exists j: p_z^{j+1} - p_z^j > h_{rob} \& p_z^j - p_z^1 < \tau_b, \tag{3}$$

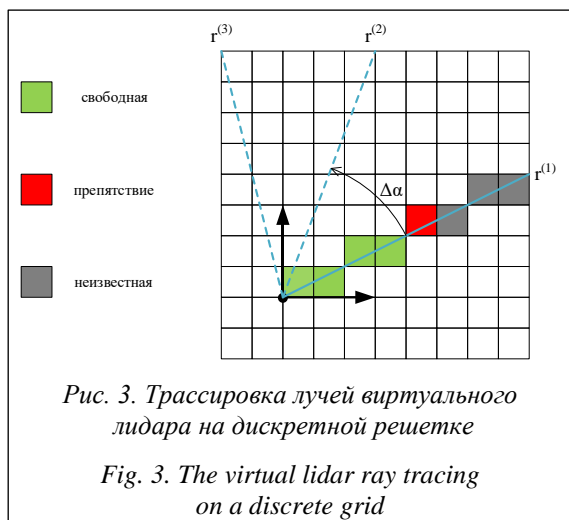
где  $N$  – количество точек в ячейке;  $p_z^N, p_z^1, p_z^j$  – высота последней, первой и  $j$ -й точек в массиве соответственно;  $\tau_b$  – пороговое значение высоты для присвоения ячейке статуса препятствия;  $h_{rob}$  – минимальная высота, необходимая для проезда робота.

Положительными препятствиями называют вертикально протяженные объекты, непроходимые для РП, нависающими – различные тоннели, перекрытия мостов, ветви деревьев и т.д., под которыми РП может свободно перемещаться. Ячейки, в которых выполняется (2) и не выполняется (3), помечаются в единовременной карте как препятствия.

Карта с размеченными препятствиями подается на вход алгоритма трассировки лучей, который воспроизводит физический принцип работы лидара. Лидар излучает электромагнитные импульсы в определенных направлениях, которые затем отражаются от различных объектов окружающей среды. Все пространство, пройденное этими импульсами до момента отражения, свободно от препятствий. Для этого в соответствии с расположением сенсора на платформе на карту помещается виртуальный лидар, от которого и строятся траектории распространения лучей. Все ячейки на таких траекториях обходятся в порядке распространения луча (рис. 3). До первого препятствия ячейки помечаются как свободные, а после – как ячейки с неизвестным типом проходимости (далее – неизвестные). Таким образом, алгоритм трассировки используется, чтобы размечать ячейки, в которые не попало достаточное количество точек облака, чтобы считать эти ячейки препятствием. Этот алгоритм позволяет решить проблему низкой плотности данных от лидаров, связанную с их низким вертикальным разрешением.

### Построение карты по данным от нескольких лидаров

Алгоритм, приведенный в данной работе, дополняет алгоритм из [6] возможностью ра-



боты с несколькими лидарами. Существуют два подхода комплексирования данных от нескольких лидаров [8]. Первый подход – это комплексирование на уровне облаков точек, при котором массивы точек от всех лидаров объединяются и затем подаются на вход для дальнейшей обработки. Второй подход предполагает обработку каждого облака точек отдельно, а объединяются собственно результаты работы алгоритма на данных от разных сенсоров. В случае первого подхода сообщения от разных лидаров нуждаются во временной синхронизации. В противном случае они будут записаны в разные моменты времени, что при движении РП приводит к большим погрешностям в определении координат препятствия. Такой эффект наблюдается даже при работе с единственным круговым сканирующим лидаром. Кроме того, не все существующие сканирующие лазерные дальномеры поддерживают возможность аппаратной синхронизации.

По этим причинам комплексирование данных от различных источников производится на уровне карт занятости, а не облаков точек. На рисунке 1 представлена упрощенная схема алгоритма синтеза единовременной и накапливаемой карт. Процессы построения единовременной и накапливаемой карт выполняются раздельно соответствующими программными компонентами. Единовременные карты строятся независимо для каждого лидара, а затем объединяются в одну общую накапливаемую модель (рис. 4).

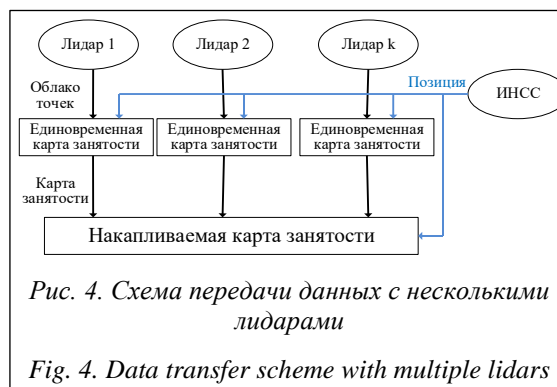
Для такого объединения карт необходимо точно знать позицию и ориентацию РП в пространстве в момент съемки облака точек от каждого из лидаров. Для этого компоненты построения единовременной карты сохраняют со-

общения от инерциально-навигационной спутниковой системы (ИНСС) на борту РП синхронно с сообщением от лидара. Также сообщения от ИНСС используются при обновлении накапливаемой карты, чтобы нивелировать расстояние, пройденное РП за время обработки облака точек компонентом построения единовременной карты.

### Алгоритм трассировки лучей

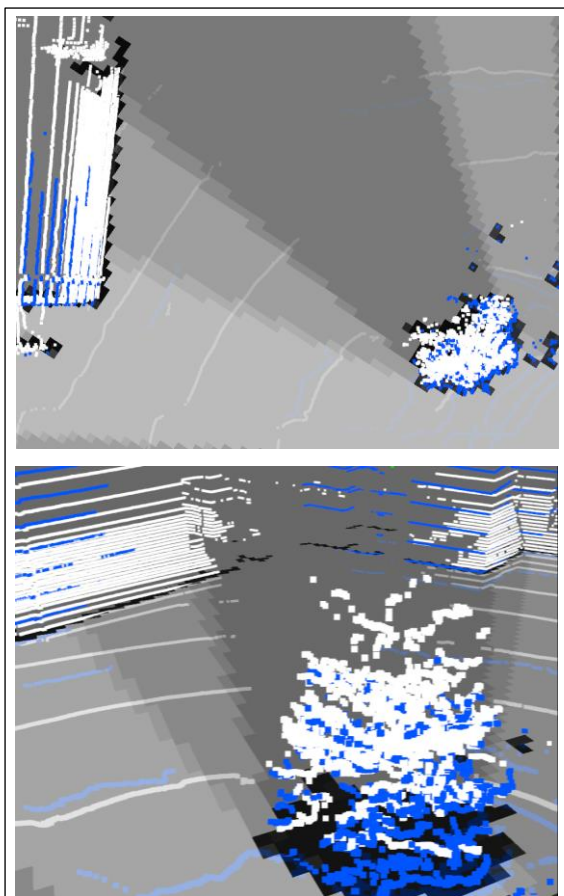
В [6] алгоритм трассировки лучей используется для маркировки свободных и неизвестных ячеек. Ячейки обходятся в порядке распространения луча и до ячейки-препятствия помечаются как свободные, а после – как неизвестные. В случае с единственным лидаром, размещенным на РП, эти зоны вне поля прямой видимости с неизвестным типом проходимости могут занимать большую область карты, что повышает риск необнаружения в них препятствия. Несколько сенсоров помогают уменьшить размер и количество слепых зон, однако требуют более сложного алгоритма маркировки ячеек. Для объединения данных от нескольких сенсоров в одной карте предлагается следующий подход.

Все единовременные карты и накапливаемая карта имеют общую систему координат с центром, привязанным к положению робота. При этом трассировка лучей в каждой из единовременных карт происходит из ячейки, в которой находится соответствующий лидар. Для получения точной информации о взаимном положении лазерных дальномеров и ИНСС производится их калибровка [9]. При трассировке лучей от нескольких лидаров возможна ситуация, при которой одной и той же ячейке будет присвоен разный статус в различных единовременных картах. В этом случае приоритет маркировки следующий: 1 – ячейка-препятствие, 2 – свободная ячейка, 3 – неизвестная ячейка.





Таким образом, количество неизвестных из-за перекрытия области видимости ячеек карты уменьшается, и при этом не теряется информация о препятствиях в таких зонах. Карты, синтезированные по данным от нескольких и от одного источника, продемонстрированы на рисунке 5. Темно-серым цветом выделена область с неизвестными ячейками, серым – свободная область, наблюдаемая только одним лидаром (точки белого цвета), светло-серым – свободная область, видимая двумя лидарами (белые и синие точки). Черными ячейками выделены препятствия.



*Рис. 5. Результат работы алгоритма трассировки для нескольких лидаров на реальной сцене*

*Fig. 5. The ray tracing algorithm result for several lidars on a real scene*

### Адаптивный буфер безопасности

При решении задач определения препятствий движению РП и планирования траектории необходимо не только точно локализовать

положение препятствий, но и учитывать габариты платформы. Наиболее широко используемым решением является добавление буфера безопасности – искусственного расширения препятствий. Радиус области, на которую расширяется препятствие, зависит от габаритов РП и обычно выбирается равным половине от наибольшего измерения платформы. Основная проблема такого подхода заключается в том, что при объезде препятствия кратчайшая, а следовательно, оптимальная, траектория движения будет вплотную прилегать к этому буферу. В реальных условиях при движении в узких проходах (например, в тоннелях) подобный маршрут движения может оказаться небезопасным. При этом наиболее безопасной будет равноудаленная от препятствий траектория движения. Для этого вводится так называемый адаптивный буфер безопасности. Он состоит из двух частей: жесткого буфера, где запрещены планирование траекторий и движение, и мягкого буфера, где запрещено планирование и разрешено движение. Изначально траектория строится в обход обоих буферов, но при движении изменяется поле зрения сенсоров, что приводит к появлению новых препятствий. В подобных ситуациях траектория перестраивается, только если пересекает жесткий буфер. Этот буфер строится как непроходимая область вокруг каждой ячейки препятствия шириной, равной половине наибольшего габарита РП. Мягкий буфер строится вокруг жесткого по следующему алгоритму:

- карта занятости с добавленным на нее жестким буфером бинаризуется;
- по бинаризованному изображению выполняется дистантное преобразование;
- к полученному изображению применяется оператор Лапласа.

В результате работы алгоритма получаем мягкий буфер, который увеличивает расстояние от планируемой траектории до препятствий на заданное значение, а в случае пересечения с буфером от другого препятствия оставляет равноудаленную от этих двух препятствий зону. Результат работы алгоритма показан на рисунке 6. Слева и справа на сцене находятся естественные препятствия (кусты и деревья), вокруг которых строится буфер безопасности. Размеры жесткого и мягкого буферов соответственно равны 1,8 и 1,2 м. Белым цветом выделены свободные для перемещения ячейки, черным – препятствия, темно- и светло-серым со-

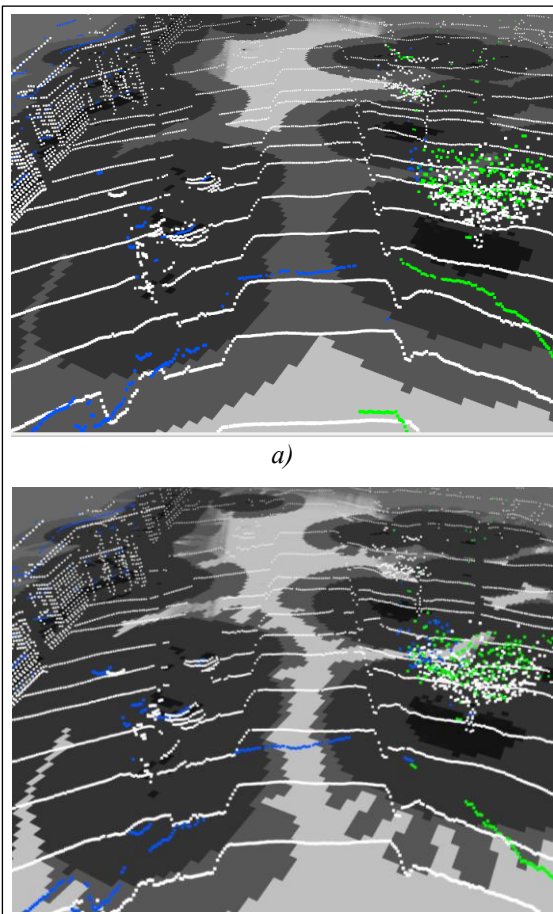


Рис. 6. Адаптивный буфер безопасности без оператора Лапласа (а) и с ним (б)  
 Fig. 6. Adaptive safety buffer without Laplace operator (a) and with it (б)

ответственно жесткий и мягкий буферы. Белым, синим и зеленым выделены также облака точек от различных лидаров. Если не используется оператор Лапласа, между препятствиями не существует свободных ячеек, по которым можно построить траекторию движения. При его применении пересечение буферов от двух препятствий вырезается и появляется свободная область, по которой возможно планировать траекторию. Подобный подход более подробно описан в [10].

**Проведенные исследования**

Разработка и начальное тестирование алгоритма проводились в среде симуляции CARLA на синтетических данных [11]. Дальнейшая проверка работы осуществлялась на реальных данных (рис. 7), заснятых на автомобиле Kia Soul с 3 встроенными лидарами Velodyne:

32-лучевым VLP32C на крыше и двумя 16-лучевыми VLP16, встроенными в крылья автомобиля (рис. 7), а также с бортовой ИИСС Atlans-C, с которой поступали данные о положении и ориентации автомобиля. При этом датчики в среде симуляции были размещены так же, как и на реальном автомобиле.

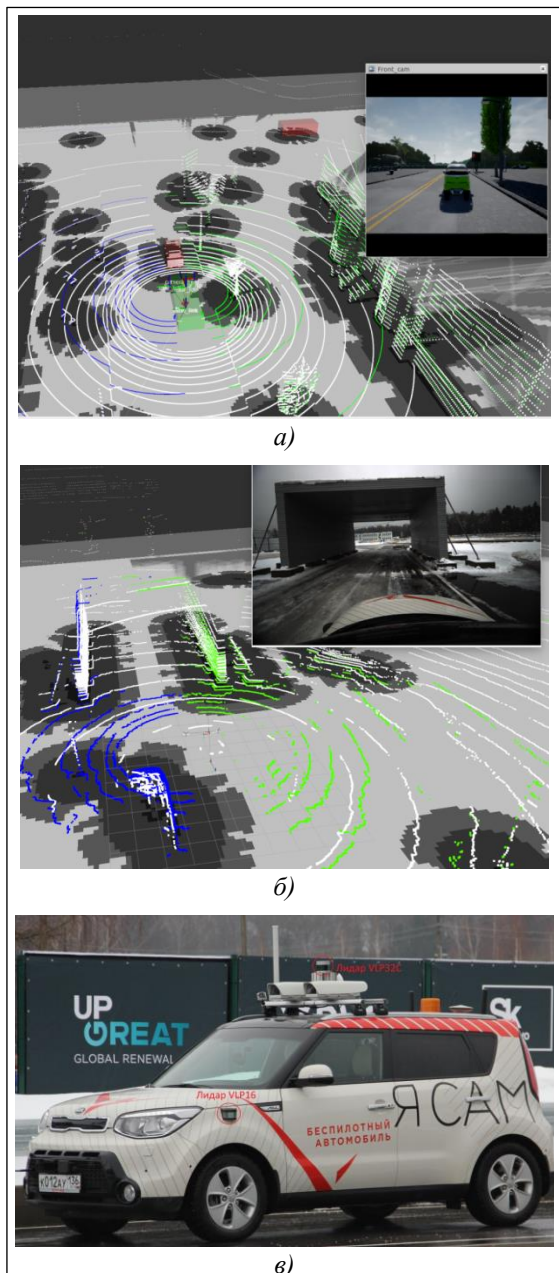


Рис. 7. Карта занятости в среде CARLA (а) и на реальной сцене (б). Беспилотный автомобиль Kia Soul с системой технического зрения (в)

Fig. 7. Occupancy grid in the CARLA (a) and in the real scenario (б). Self-driving Kia Soul with a vision system (в)



Быстродействие программных компонент проверялось на двух наборах данных длиной в 3 минуты, один из которых был синтезирован с помощью среды CARLA, а другой снят в реальных условиях. Вычисления проводились на компьютере с процессором Intel Core i7-8700 3.2 ГГц и 32 ГБ оперативной памяти. Среднее время обработки единовременной карты для 16- и 32-лучевого лидаров составила 38 мс и 64 мс соответственно, в то время как синтез накапливаемой карты происходит за 16 мс. Такое быстродействие показывает, что и на реальных, и на модельных данных время обработки одного облака точек меньше, чем период между сообщениями с этими облаками (стандартный для лидаров Velodyne – 100 мс), что позволяет использовать программную реализацию алгоритма в реальном масштабе времени.

Представленная в статье модификация алгоритма построения карты занятости позволяет обрабатывать данные от нескольких различных лидаров в реальном масштабе времени, а также учитывать взаимное расположение датчиков на роботизированной платформе, за счет чего уменьшается слепая зона. Кроме того, представлена модификация, дающая возмож-

ность синтезировать на карте буфер безопасности, позволяющий РП планировать траекторию в узких местах. Модифицированный алгоритм был протестирован как на модельных, так и на реальных данных.

### Дальнейшее развитие подхода

Предложенный алгоритм комплексировывает данные от разных источников на уровне единовременных карт проходимости, но при этом алгоритм построения таких карт не универсален, а зависит от физической природы обрабатываемых данных. Для дальнейшего развития такого подхода к комплексированию необходимо разработать алгоритмы построения карт занятости по облакам точек от стереокамер и по радарным данным. Эти три типа сенсоров наиболее часто используются в робототехнических системах. Облака точек от стереокамер отличаются большей плотностью, чем лидарные, но намного более низкой точностью измерения дальности, в то время как радары миллиметрового диапазона характеризуются меньшим разрешением и плотностью возвращаемых данных.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-07-00570.*

*Экспериментальные исследования проведены совместно с Научно-конструкторским бюро вычислительных систем (г. Таганрог).*

### Литература

1. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. Computer, 1989, no. 6, pp. 46–57.
2. Souza A., Gonçalves L.M.G. Occupancy-elevation grid: an alternative approach for robotic mapping and navigation. Robotica, 2016, no. 11, pp. 2592–2609.
3. Häselich M., Arends M., Wojke N., Neuhaus F., Paulus D. Probabilistic terrain classification in unstructured environments. Robotics and Autonomous Systems, 2013, no. 10, pp. 1051–1059.
4. Himmelsbach M., Mueller A., Luttel T., Wunsche H.J. LIDAR-based 3D object perception. Proc. of 1st Intern. Workshop on Cognition for Technical Systems. 2008. URL: [https://mafiadoc.com/lidar-based-3d-object-perception-semantic-scholar\\_59a692091723dd0b40ac9c7c.html](https://mafiadoc.com/lidar-based-3d-object-perception-semantic-scholar_59a692091723dd0b40ac9c7c.html) (дата обращения: 27.12.2019).
5. Shang E., An X., Li J., He H. A novel setup method of 3D LIDAR for negative obstacle detection in field environment. Proc. 17th Intern. IEEE Conf. ITSC, 2014, pp. 1436–1441.
6. Jaspers H., Himmelsbach M., Wunsche H.J. Multi-modal local terrain maps from vision and LiDAR. Proc. IV Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2017, pp. 1119–1125.
7. Kelly A., Stentz A. Rough terrain autonomous mobility. Pt. 2: An active vision, predictive control approach. Autonomous Robots, 1998, vol. 5, no. 2, pp. 163–198.
8. Mertz C., Navarro-Serment L.E., MacLachlan R., Rybski P., Steinfeld A., Suppe A., Urmson C., Vandapel N., Hebert M., Thorpe C. Moving object detection with laser scanners. J. Field Robotics, 2013, no. 1, pp. 17–43.
9. Taylor Z., Nieto J. Motion-based calibration of multimodal sensor extrinsics and timing offset estimation. Transactions on Robotics, 2016, no. 5, pp. 1215–1229.
10. Чернухин Ю.В., Бутов П.А. Синтез тормозных квазиполей препятствий для бортовой системы автономного планирования траектории движения малогабаритных мобильных роботов // Инженерный

вестник Дона. 2014. № 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2382> (дата обращения: 27.12.2019).

11. Dosovitskiy A., Ros G., Codevilla F., Lopez A., Koltun V. CARLA: An open urban driving simulator. Proc. CORL, 2017, arXiv:1711.03938 [cs.LG].

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.257-265

Received 27.01.20  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 257–265

## Modified algorithm for building an occupancy grid from multi-lidar point cloud

I.O. Shepel<sup>1,2</sup>, Research Engineer, Postgraduate Student, [info@ictis.sfedu.ru](mailto:info@ictis.sfedu.ru)

<sup>1</sup> Scientific Design Bureau of Computing Systems, Taganrog, 347936, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Computer Technologies and Information Security of Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers building a possibility model problem for the environment using data from several sensors installed on a robotic platform. This is the key problem for solving the autonomous movement problem without using any a priori information. Several sensors usage due to the sensor physical limitations and to reduce blind spots around autonomous robotic platforms. The work aim is to improve occupancy grid building by adding the ability to process data from several independent sources.

The paper presents an algorithm for constructing an occupancy grid for a technical vision system consisting of several spaced lidars. There is an approach to combining data from different sensors without requiring hardware data synchronization.

This merge occurs at the algorithmic level and does not impose any restrictions on the number of sensors or on the physical nature of their data.

It allows processing point clouds from sensors independently, thus reducing the computational complexity compared to processing a combined point cloud.

In addition, there is a ray-tracing algorithm extension, which takes into account the placement of several leaders on a robotic platform and combines the view fields for these sensors, which allows them to get a more complete model of the cross-country environment. The described modified algorithm for building an adaptive safety buffer around obstacles on the occupancy grid makes it possible to plan a trajectory at an equal distance from objects in complex scenarios.

**Keywords:** occupancy grid, lidar, point cloud, data merging, obstacle detection, autonomous movement.

**Acknowledgements.** The reported study was with the financial support of the RFBR, project no. 19-07-00570.

Experimental research were conducted with the Scientific-Design Bureau of Computing Systems (Taganrog).

## References

1. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer*, 1989, no. 6, pp. 46–57.
2. Souza A., Gonçalves L.M.G. Occupancy-elevation grid: An alternative approach for robotic mapping and navigation. *Robotica*, 2016, no. 11, pp. 2592–2609.
3. Häselich M., Arends M., Wojke N., Neuhaus F., Paulus D. Probabilistic terrain classification in unstructured environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, no. 10, pp. 1051–1059.
4. Himmelsbach M., Mueller A., Luttel T., Wunsche H.J. LIDAR-based 3D object perception. *Proc. of 1st Intern. Workshop on Cognition for Technical Systems*, 2008. Available at: [https://mafiadoc.com/lidar-based-3d-object-perception-semantic-scholar\\_59a692091723dd0b40ac9c7c.html](https://mafiadoc.com/lidar-based-3d-object-perception-semantic-scholar_59a692091723dd0b40ac9c7c.html) (accessed December 27, 2019).
5. Shang E., An X., Li J., He H. A novel setup method of 3D LIDAR for negative obstacle detection in field environment. *Proc. 17th Intern. IEEE Conf. ITSC*, 2014, pp. 1436–1441.
6. Jaspers H., Himmelsbach M., Wuensche H.J. Multi-modal local terrain maps from vision and LiDAR. *Proc. IV Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2017, pp. 1119–1125.

7. Kelly A., Stentz A. Rough terrain autonomous mobility. Pt. 2: An active vision, predictive control approach. *Autonomous Robots*, 1998, vol. 5, no. 2, pp. 163–198.
8. Mertz C., Navarro-Serment L.E., MacLachlan R., Rybski P., Steinfeld A., Suppe A., Urmson C., Vandapel N., Hebert M., Thorpe C. Moving object detection with laser scanners. *J. Field Robotics*, 2013, no. 1, pp. 17–43.
9. Taylor Z., Nieto J. Motion-based calibration of multimodal sensor extrinsics and timing offset estimation. *Transactions on Robotics*, 2016, no. 5, pp. 1215–1229.
10. Chernukhin Yu.V., Butov P.A. The synthesis of inhibitory quasi-fields of obstacles for SUGV on-board path planning system. *Eng. J. of Don*, 2014, no. 2. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2382> (accessed December 27, 2019) (in Russ.).
11. Dosovitskiy A., Ros G., Codevilla F., Lopez A., Koltun V. CARLA: An open urban driving simulator. *Proc. Conf. on Robot Learning*, 2017, arXiv:1711.03938 [cs.LG].

#### Для цитирования

Шепель И.О. Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 257–265. DOI: 10.15827/0236-235X.130.257-265.

#### For citation

Shepel I.O. Modified algorithm for building an occupancy grid from multi-lidar point cloud. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 257–265 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.257-265.

УДК 004.056  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.266-275

Дата подачи статьи: 03.12.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 266–275

## **Моделирование аутентификации пользователей по динамике нажатий клавиш в промышленных автоматизированных системах**

*М.В. Тумбинская*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Системы информационной безопасности», *tumbinskaaya@inbox.ru*

*Н.Ф. Асадуллин*<sup>1</sup>, студент, *nail.asadullin.1997@mail.ru*

*Р.Р. Муртазин*<sup>1</sup>, студент, *ramichhh@gmail.com*

<sup>1</sup> *Казанский национальный исследовательский технический университет, г. Казань, 420111, Россия*

Современные промышленные автоматизированные системы управления используются повсеместно. Сложная архитектура таких систем, требования непрерывности процесса и доступа к сети Интернет делают их легкоуязвимыми для злоумышленников и кибератак. В настоящее время компоненты промышленных автоматизированных систем управления не являются полностью защищенными, следовательно, возникает потребность в их адекватной защите и повышении уровня информационной безопасности.

Как показывает анализ предметной области, 82 % промышленных предприятий не могут противостоять внутреннему нарушителю, который стремится проникнуть в технологическую сеть из корпоративной. Получив доступ к технологическому сегменту сети, он имеет широкие возможности злонамеренного влияния на компоненты автоматизированных систем управления. В 2018 году количество новых уязвимостей в компонентах промышленных автоматизированных систем увеличилось на 30 % по сравнению с 2017 годом. Значительная доля уязвимостей в промышленных автоматизированных системах управления связана с некорректной аутентификацией или избыточными правами доступа пользователей. При этом больше половины уязвимостей могут эксплуатироваться удаленно.

В статье представлен обзор уязвимостей информационной безопасности промышленных автоматизированных систем. На основе анализа предметной области авторы предлагают трехуровневую модель повышения точности аутентификации пользователей по динамике нажатия клавиш, которая позволит повысить уровень безопасности автоматизированных систем управления. Проведено экспериментальное исследование, показавшее высокую способность предложенной модели разграничения доступа для легальных пользователей и злоумышленников с учетом незначительных изменений параметров динамики нажатия клавиш повысить точность аутентификации пользователей. Достоверность аутентификации и пользователей на практике составила 97,5 %.

**Ключевые слова:** *точность аутентификации, клавиатурный почерк, динамика нажатия клавиш, биометрия, аутентификация, кластеризация.*

Задачи идентификации пользователей при использовании информационных систем, в том числе промышленных автоматизированных систем управления, достаточно изучены, но остаются актуальными. Существующие решения основаны на ограниченном количестве методов и средств: электронных замках, аутентификации, технологиях биометрической идентификации [1, 2]. В последнее время широкое распространение получили методы биометрической идентификации пользователей, одним из которых является метод идентификации по динамике нажатия клавиш, то есть по характеру набора на клавиатуре произвольного текста или произвольной парольной фразы.

Принцип идентификации пользователей по динамике нажатия клавиш заключается в воз-

можности проведения анализа временных характеристик нажатий клавиш при вводе парольной фразы. При многократном вводе одной и той же фразы подготовленный пользователь обычно осуществляет большую часть манипуляций с клавиатурой на бессознательном уровне, что и порождает эффект клавиатурного почерка, то есть при вводе пароля пользователь формирует автоматический стереотип действий. Контролируемыми параметрами клавиатурного ввода являются время нажатия каждой клавиши из пароля и временные интервалы между нажатием соседних клавиш. В работах [3–5] показаны результаты исследований, в которых точность идентификации пользователей по клавиатурному почерку составляет более 97 %. Существуют исследова-

ния и зарубежных авторов. Так, например, в работе [6] описана система идентификации пользователей по динамике нажатия клавиш, и из восьми тестируемых пользователей только три были идентифицированы, вероятность распознавания составила 37,5 %. В работе [7] описано, что только один из восьми пользователей был распознан, вероятность распознавания – 12,5 %.

Современные промышленные автоматизированные системы управления позволяют аутентифицировать пользователей, как правило, по логину и паролю. Метод аутентификации пользователей по динамике нажатия клавиш не требует никакого специального оборудования, но обладает недостатком – низкой точностью. В данной работе предлагается трехуровневая модель повышения точности аутентификации пользователей по динамике нажатия клавиш, позволяющая повысить эффективность аутентификации не только в автоматизированных системах управления, но и в сложных, критически важных и потенциально опасных объектах промышленности.

#### Обзор существующих решений в области аутентификации пользователей в автоматизированных системах управления

Анализ работ [8, 9] показал, что 82 % промышленных предприятий не могут противостоять внутреннему нарушителю, который стремится проникнуть в технологическую сеть из корпоративной. После получения доступа к технологическому сегменту сети у злоумышленника появляются широкие возможности по злонамеренному влиянию на компоненты автоматизированных систем управления.

По сравнению с 2017 годом в 2018 году количество новых уязвимостей в компонентах промышленных автоматизированных систем увеличилось на 30 %. Как правило, анализ таких систем выявляет несколько уязвимостей. Наиболее часто встречающиеся уязвимости представлены в таблице 1.

С каждым годом наблюдается рост случаев обнаружения уязвимостей в автоматизированных системах управления: 2013 г. – 158 случаев, 2014 г. – 181, 2015 г. – 212, 2016 г. – 115, 2017 г. – 197, 2018 г. – 257.

Значительная доля уязвимостей связана с некорректной аутентификацией или избыточными правами доступа пользователей. При этом больше половины из них (64 %) могут эксплуатироваться удаленно.

В таблице 2 на основе анализа данных из работ [10, 11] представлена информация о распределениях уязвимостей в автоматизированных системах управления по типу.

В настоящее время компоненты промышленных автоматизированных систем управления не являются полностью защищенными, следовательно, возникает потребность в их адекватной защите, повышении уровня информационной безопасности.

**Физиологическая биометрия.** Решение применяется для аутентификации пользователей на основе физиологических данных (отпечатки пальцев, структура лица, радужная оболочка и др.). Данное решение доказало надежность только в части идентификации пользователей по распознаванию радужной оболочки глаз [5, 12], другие способы идентификации на основе физиологических данных не подтвердили своей надежности [7, 13, 14].

**Поведенческая биометрия.** Данное решение позволяет идентифицировать пользователя на основе уникальных характеристик его поведения (походка, голосовой ритм, почерк, клавиатурный почерк, характер подписи и т.д.). В работах [13, 15, 16] предложено использовать коэффициент корреляции для сравнения вновь напечатанных данных с данными, хранящимися в БД:

$$r = \sum_i^n (k_i * t_i) / \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 * \sum_{i=1}^n t_i^2}, \quad (1)$$

где  $k_i$  – вектор длины ( $i = \overline{1, n}$ ), отражающий интервал времени (разница между отпусканием и последующим нажатием клавиши) между нажатиями клавиш в эталонной подписи;  $t_i$  – вектор длины ( $i = \overline{1, n}$ ), в котором хранятся временные интервалы между нажатиями клавиш в пробной подписи.

Данное решение неэффективно при работе с большими объемами данных.

Авторы работ [5–7], учитывая скорость набора текста, частоту нажатия клавиш, движения мыши и время задержки нажатия клавиш, предложили модель на основе нейронной сети [16, 17]. Результаты исследований показали, что пользователи успешно идентифицированы в случаях, когда сходство между сохраненным шаблоном и текущими данными было более 90 %. Модель на основе нейронной сети содержала модуль дополнения, который обновлял шаблон каждый раз, когда пользователь успешно проходил идентификацию. Решение неэффективно для небольших наборов данных из-за сложности обобщения.

Таблица 1

**Уязвимости, выявленные в промышленных автоматизированных системах управления  
в 2018 году**

Table 1

**Vulnerabilities identified in industrial automated control systems in 2018**

| Уязвимость  | Рейтинг опасности CVSS | ПО  |
|---|------------------------|---|
| PT-2018-38: Раскрытие информации                      | 9.8                    | MGE Galaxy 3000, 4000, 5000, 6000, 9000   |
| PT-2018-37: Несанкционированные действия              | 7.5                    | MGE EPS 6000, 7000, 8000  |
| PT-2018-36: Раскрытие информации                      | 5.3                    | MGE Comet UPS   |
| PT-2018-35: Обход авторизации                         | 10                     | MGE Galaxy PW<br>STS (MGE Upsilon)  |
| PT-2018-31: Внедрение внешних сущностей               | 5.3                    | Cisco Secure ACS 5.x  |
| PT-2018-29: Межсайтовое выполнение хранимых сценариев | 5.4                    |   |
| PT-2018-28: Выполнение произвольных команд            | 9.8                    |   |
| PT-2018-26: Раскрытие информации                      | 6.1                    | MatrikonOPC Explorer 5.x  |
| PT-2018-21: Переполнение буфера                       | 7.5                    | Schneider Electric Modicon Quantum<br>Schneider Electric Modicon Premium<br>Schneider Electric Modicon M340 |
| PT-2018-20: Выполнение произвольных команд            | 9.8                    | Schneider Electric Modicon BMXNOR0200   |
| PT-2018-19: Обход авторизации                         | 9.8                    | Schneider Electric Modicon Quantum  |
| PT-2018-17: Раскрытие информации                      | 9.8                    | Schneider Electric Modicon Premium<br>Schneider Electric Modicon M340                                       |
| PT-2018-16: Жестко закодированные учетные данные      | 9.8                    | Schneider Electric Modicon BMXNOR0200   |
| PT-2018-15: Выполнение произвольных команд            | 8.8                    | Schneider Electric Modicon Quantum  |
| PT-2018-14: Переполнение буфера                       | 9.0                    | PHOENIX CONTACT FL SWITCH 3xxx,<br>FL SWITCH 4xxx,  |
| PT-2018-13: Внедрение команд                          | 9.1                    | FL SWITCH 48xxx   |
| PT-2018-02: Ошибка авторизации                        | 9.8                    | Ipswitch WhatsUp Gold 17.x  |
| PT-2018-10: Подмена запроса на стороне сервера        | 9.8                    |   |
| PT-2018-09: Внедрение команд                          | 9.8                    |   |
| PT-2018-08: Внедрение SQL-кода                        | 9.8                    |   |
| PT-2018-07: Выполнение произвольных команд            | 9.8                    |   |
| PT-2018-06: Обход аутентификации                      | 9.8                    | Hirschmann RSR, RS, RSB, MACH100,<br>MACH1000, MACH4000, OCTOPUS, MS  |
| PT-2018-05: Несанкционированное изменение прошивки    | 7.5                    | Siemens EN100   |
| PT-2018-04: Раскрытие информации                      | 9.0                    | Siemens SIPROTEC 4, SIPROTEC Compact  |
| PT-2018-03: Перехват управления                       | 10                     | Siemens DIGSI 4, EN100  |

В работе предлагается трехуровневая модель повышения точности аутентификации пользователей по динамике нажатия клавиш.

Перед началом использования промышленной автоматизированной системы управления пользователю предлагается пройти авторизацию в системе (ввод логина, пароля и других параметров). После успешной авторизации пользователь может пройти аутентификацию, при этом для подтверждения аутентификации измеряются клавиатурные параметры пользователя, формируются эталоны и выполняется сравнение параметров пользователей по критерию сравнения центров распределения двух совокупностей при допущении, что распределение параметров клавиатурного почерка подчинено нормальному гауссов-

скому закону (стандартное отклонение) и проверке соответствия на критерий Хи-квадрат ( $\chi^2$ ). На втором уровне решается классовая задача для сравнения текущих данных с данными классов пользователей в случае, если на первом уровне пользователь не прошел аутентификацию. На третьем уровне происходит обновление данных пользователей на основе процесса рекуррентности.

На рисунке 1 представлена структурная схема детализации трехуровневой модели аутентификации пользователей.

Опишем более подробно каждый уровень предложенной модели.

**Статистический уровень.** На этом уровне измеряются временные параметры клавиатурного почерка пользователей и формируются

эталонны пользователей в виде средних значений и среднеквадратических отклонений. Далее происходит анализ стандартных отклонений между текущими входными данными и эталонными значениями. Стандартное отклонение временных параметров динамики работы пользователей на клавиатуре вычисляется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2}, \tag{2}$$

где  $S$  – стандартное отклонение;  $N$  – размер выборки из временных параметров;  $x_i$  – текущее значение выборки;  $\bar{x}_j$  – среднее значение параметров.

Таблица 2

**Распределение уязвимостей  
в автоматизированных системах  
управления по типу**

Table 2

**Vulnerability distribution in automated systems  
management by type**

| Тип уязвимости  | Доля уязвимости, % |
|---|--------------------|
| Избыточные права и привилегии, недостаточный контроль доступа | 11                 |
| Неправильная проверка ввода                                   | 9                  |
| Уязвимости при работе с памятью                               | 8                  |
| Выход за пределы назначенного каталога                        | 7                  |
| Раскрытие информации  | 6                  |
| Внедрение команд  | 6                  |
| Некорректный контроль доступа                                 | 5                  |
| Внедрение операторов SQL                                      | 5                  |
| Межсайтовое выполнение сценариев                              | 4                  |
| Некорректный механизм аутентификации                          | 4                  |
| Другие  | 35                 |

Вычисленное значение  $S$  сравнивается с сохраненным стандартным отклонением, которое рассчитывается на основе ранее собранных данных конкретного пользователя. Если разница между этими двумя значениями незначительная (в данном случае меньше 3), пользователь принимается, в противном случае осуществляется переход к проверке критерия  $\chi^2$ .

**Следующий уровень** – выполнение теста  $\chi^2$  для подтверждения или опровержения гипотезы. В предлагаемой системе в качестве гипотезы для теста принимается предположение «Пользователь легальный». Данный тест предполагает одну степень свободы, поскольку возможны только два результата: пользователь ле-

гальный или нелегальный. Степень свободы используется для выбора критического значения в статистической таблице [18]. Критическое значение выбирается в зависимости от желаемого уровня точности. Для предложенной системы был выбран уровень достоверности 97,5 %, который означает вероятность того, что решение о принятии или отклонении гипотезы является верным. Чтобы доказать, верна ли гипотеза, необходимо использовать уже сохраненное среднее значение атрибута в качестве ожидаемого значения и среднее значение входного атрибута в качестве наблюдаемого значения. Цель теста – выяснить, является ли разница между наблюдаемым средним (входным) и ожидаемым средним (сохраненным) результатом случайности или других факторов. Вычисления проводятся по формуле

$$\chi^2 = \sum \frac{(\bar{x}_j - L_i)^2}{L_i}, \tag{3}$$

где  $\chi^2$  – значение критерия Хи-квадрат;  $\bar{x}_j$  – наблюдаемое значение (среднее значение временного параметра клавиатурного почерка);  $L_i$  – ожидаемое значение (среднее значение, сохраненное в эталоне пользователя) [18].

Значение  $\chi^2$  должно быть меньше или равно критическому значению, выбранному из статистической таблицы [18], чтобы принять гипотезу. Если значение  $\chi^2$  меньше или равно критическому значению, пользователь принимается с вероятностью 97,5 %, в противном случае пользователь отклоняется и переходит на следующий уровень модели аутентификации.

**Уровень классификации.** На этом уровне определяется набор классифицируемых признаков наборных характеристик пользователей в составлении априорного словаря классов. Основное в данной задаче – выбор надлежащего принципа классификации этих характеристик. Последнее определяется требованиями, предъявляемыми к системе распознавания, которые, в свою очередь, зависят от того, какие решения могут приниматься системой управления по результатам распознавания неизвестных характеристик клавиатурного почерка. Далее, на примере работы [19], осуществляем определение параметров классов путем разбиения характеристик почерка на классы  $L_1, \dots, L_m$ . Требуется выделить в пространстве наборных характеристик области  $S_i, i = 1, \dots, m$ , эквивалентные классам, то есть, если характеристика клавиатурного почерка, имеющая параметры

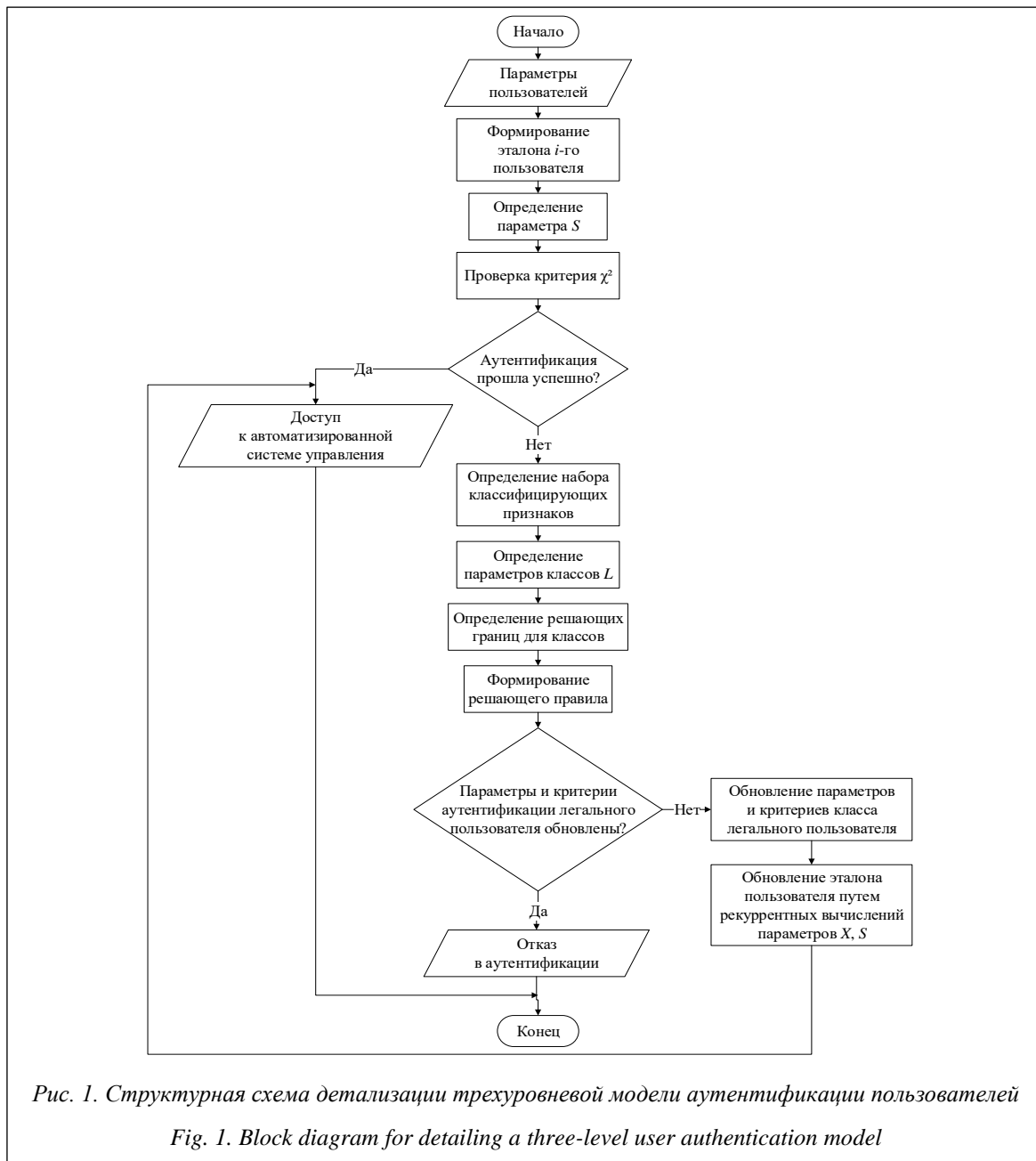


Рис. 1. Структурная схема детализации трехуровневой модели аутентификации пользователей

Fig. 1. Block diagram for detailing a three-level user authentication model

$x^0_1, \dots, x^0_N$ , относится к классу  $L_i$ , то представляющее его в пространстве наборных характеристик значение принадлежит области  $S_i$ . Пример разбиения классов для представленной задачи показан на рисунке 2.

Таким образом можно определить решающую границу между областями  $S_i$ , соответствующими классам  $L_i$ .

На рисунке 2 показано разбиение двумерного пространства наборных характеристик клавиатурного почерка на области  $S_1, S_2$ , соответствующие классам  $L_1, L_2$ .

В области  $S_1$  находятся параметры клавиатурного почерка первого класса легальных

пользователей, а в области  $S_2$  – параметры случайных, незарегистрированных пользователей,  $l$  – решающая граница.

Задав разделяющие функции, можно проверить выполнение условий.

Если  $F_1(x_1, x_2) > F_2(x_1, x_2)$ , то параметры относятся к легальному пользователю системы, если  $F_1(x_1, x_2) < F_2(x_1, x_2)$ , то текущий пользователь (проходящий процедуру идентификации) распознается как «чужой» и игнорируется системой.

Если пользователь распознан как «свой», происходит обновление параметров  $\bar{x}_j$  и  $S$ , сохраненных как эталонные значения, в соответ-



ствии с рекуррентными отношениями вида:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \tag{4}$$

где  $\bar{x}_j$  – среднее значение параметров пользователя;  $N$  – количество наблюдений;  $x_i$  – текущее значение параметров пользователя;

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}_j|, \tag{5}$$

где  $S$  – среднеквадратичное отклонение (обновленное).

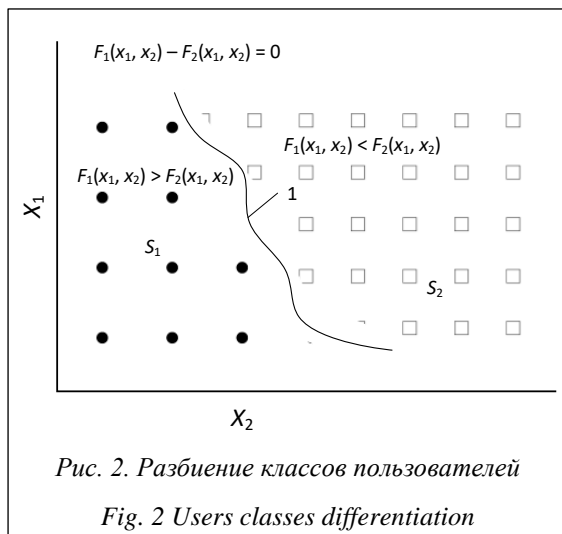


Рис. 2. Разбиение классов пользователей

Fig. 2 Users classes differentiation

### Экспериментальная часть

Для проверки работоспособности трехуровневой модели проведены экспериментальные исследования и численно-параметрические расчеты. Для эксперимента была выбрана группа из шести пользователей промышленной автоматизированной системы управления, разработанной корпорацией «Галактика», владеющих десятипальцевым слепым набором слов на клавиатуре. Сначала было предложено войти на специально разработанный web-сайт, авторизоваться, в процессе чего формировались эталоны данных пользователей по результатам их работы на клавиатуре, при этом пользователи должны были указать свои Ф.И.О., направление профессиональной деятельности, должность. Затем они перенаправлялись на другую страницу, где ими осуществлялся ввод предложенных готовых текстов на экране. Эти тексты представляли собой некие заранее подготовленные предложения, неизвестные тестируемой группе.

Далее осуществлялся сбор введенных тестируемой группой текущих данных на сто-

роне клиента из web-формы. Когда пользователь печатал символы на клавиатуре, программа-обработчик, разработанная на языке JavaScript, обрабатывала каждое нажатие и отпусkanie клавиш. Для этого использовались стандартные встроенные функции: Keydown – событие при нажатии клавиши и Keyup – событие при отпусkании клавиши.

Код обработчика событий Keyup и Keydown выглядит следующим образом:

```

kinput.onkeydown = kinput.onkeyup = kinput.onkeypress
= handle;
let lastTime = Date.now();
function handle(e) {
    if (form.elements[e.type + 'Ignore'].checked) return;
    let text = e.type + 'key=' + e.key + ' code=' + e.code +
        (e.shiftKey ? 'shiftKey': '') +
        (e.ctrlKey ? 'ctrlKey': '') +
        (e.altKey ? 'altKey': '') +
        (e.metaKey ? 'metaKey': '') +
        (e.repeat ? '(repeat)': '') + "\n";
    if (area.value && Date.now() - lastTime > 250){
        area.value += new Array(81).join('-') + "\n";
    }
    lastTime = Date.now();
    area.value += text;
    if (form.elements[e.type + 'Stop'].checked) {e.pre-
ventDefault();
}
}
    
```

При нажатии клавиши программа фиксировала первую временную метку, а при отпусkании клавиши ставила вторую временную метку, после этого вычислялась разность времени между вторым и первым событиями, что и являлось временем удержания клавиши. Кроме этого, используя встроенные функции, программа определяла код нажатой клавиши и ее символьное обозначение. Затем JavaScript-функция отправляла код, имя, время задержки клавиши и временное значение отпусkания клавиши на сервер, используя при этом AJAX-запрос для дальнейшей обработки этих данных.

На следующем этапе осуществлялся сбор данных на стороне сервера. Web-сервер был реализован на основе Apache HTTP Server 2.2 в локальной вычислительной сети на базе операционной системы Linux Mint. Обработка данных на сервере проходила на распространенном скриптовом языке PHP. При поступлении данных от пользователя на стороне сервера скрипт запрашивал БД для проверки, реализованной на MySQL, с целью определения, не были ли какие-либо предыдущие данные (нажатые клавиши) уже сохранены для текущего пользователя. Если данные уже были в базе, обработчик выбирал последние три и

использовал их временные метки для расчета временных интервалов диад, триад и тетрад путем разности значений временных меток.

В процессе эксперимента статистические данные были разделены на данные для обработки и эталонные.

Был выбран параметр «время удержания клавиш пользователями», так как он наиболее информативный в рассматриваемом случае, хотя это утверждение может быть неверно при работе с большим объемом данных.

По результатам тестов для каждого пользователя были рассчитаны и выстроены стандартные девиации текущих и эталонных данных. Результаты для всех шести тестируемых пользователей представлены в таблице 3. Кроме этого, был рассчитан критерий  $\chi^2$  для каждого тестируемого пользователя. Из таблицы видно, что пользователь под номером 2 был аутентифицирован путем сравнения стандартных девиаций между его данными и эталоном, потому что разница в девиации была менее 3, что и явилось первым шагом в процессе аутентификации.

Таблица 3

Значение девиации и критерий хи-квадрат

Table 3

Deviation value and Chi-square criterion

| Пользователь | Данные                               |                              |                     |
|--------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|
|              | Значения девиации (эталонные данные) | Значения девиации (изменные) | Критерий Хи-квадрат |
| 1            | 42                                   | 12                           | 4.82                |
| 2            | 39                                   | 38                           | 13.86               |
| 3            | 63                                   | 9                            | 5.95                |
| 4            | 62                                   | 48                           | 51.41               |
| 5            | 162                                  | 35                           | 11.84               |
| 6            | 169                                  | 41                           | 31.42               |

Пользователи № 1, 3 и 5 были аутентифицированы с использованием критерия  $\chi^2$ , поскольку их значения критерия меньше, чем критическое значение 12.71, тогда с уверенностью в 97,5 % можно утверждать, что пользователи идентифицировались верно. Результаты расчетов показывают, что 50 % пользователей прошли проверку подлинности в процессе сравнения статистических значений параметров динамики нажатия клавиш. Но нужно иметь в виду, что предложенная модель будет совершенствоваться по мере обработки большего числа данных, так как полученные статистические значения для каждого пользователя будут более верными.

Первоначальной целью было убедиться в способности предложенной модели разграни-

чить доступ для легитимных пользователей и нелегитимных, приспосабливаясь к незначительным изменениям параметров динамики нажатия клавиш, тем самым увеличивая точность аутентификации. В результате один из тестируемых пользователей был подвержен сравнению девиаций, в то время как другие три аутентифицированы с помощью критерия  $\chi^2$ . Остальные пользователи не прошли процедуру аутентификации на всех уровнях системы, что может быть обусловлено недостаточным количеством идентификационных данных. В случае работы с большим набором идентификационных данных процент безуспешного распознавания будет сведен к минимуму.

### Заключение

В работе представлен обзор решений в области аутентификации пользователей, предложена модель повышения точности аутентификации пользователей по динамике нажатия клавиш, приведены результаты экспериментального исследования.

Исследования показали, что половина данных были обработаны на статистическом уровне предложенной модели, которая по сравнению с некоторыми известными решениями является более точной в вычислительном отношении.

Проблемы с эффективностью можно оптимизировать при разработке больших систем, а простота алгоритмов и программной реализации разработанной модели позволит сэкономить вычислительную мощность в крупномасштабных системах. Применение критерия  $\chi^2$  явилось важным дополнением к статистическому сравнению из-за его способности исследовать статистические вариации, что и отразилось в исследованиях, где три тестируемых пользователя прошли процесс аутентификации после оценки критерия  $\chi^2$ . В дальнейшем планируется создать метод, работающий на уровне логического сравнения с целью повышения точности. Он будет предназначен для создания усовершенствованного эталона, в котором учитывались бы особенности каждого пользователя, а также некоторые девиации, связанные с эмоциональными состояниями пользователей, что могло бы способствовать разработке систем непрерывной аутентификации пользователей с целью мониторинга их эмоционального состояния при работе на критических объектах.

**Литература**

1. Тесленко П.А., Барская И.С., Чумаченко Е.А. Проект создания автоматизированной системы управления контейнерным терминалом // Современные информационные и электронные технологии. 2013. Т. 1. № 14. С. 74–77.
2. Алферов В.П., Дровникова И.Г., Обухова Л.А., Рогозин Е.А. Вербальная модель управления слабо уязвимым процессом разграничения доступа пользователей к программным средствам системы электронного документооборота // Вестн. ДГТУ. 2019. Т. 46. № 2. С. 37–49.
3. Костюченко Е.Ю., Мещеряков Р.В. Распознавания пользователя по клавиатурному почерку на фиксированной парольной фразе в компьютерных системах // Изв. ЮФУ. 2003. № 4. С. 177–178.
4. Тумбинская М.В., Баянов Б.И., Рахимов Р.Ж., Кормильцев Н.В., Уваров А.Д. Анализ и прогнозирование вредоносного сетевого трафика в облачных сервисах // Бизнес-информатика. 2019. № 1. С. 71–81. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.71.81.
5. Sharipov R.R., Tumbinskaya M.V., Abzalov A.R. Analysis of users keyboard handwriting based on Gaussian reference signals. Proc. Intern. RusAutoConf., 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867753.
6. Шарипов Р.Р., Сафиуллин Н.З. Аппаратурный анализ клавиатурного почерка с использованием эталонных гауссовских сигналов // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2006. № 2. С. 21–23.
7. D’Lima N., Mittal J. Password authentication using keystroke biometrics. Proc. IEEE Intern. Conf. ICCICT, Mumbai, 2015, pp. 1–6.
8. Промышленные компании: векторы атак. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-attacks-2018/> (дата обращения: 15.11.2019).
9. Анализ уязвимостей компонентов АСУ ТП. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-vulnerabilities-2019/> (дата обращения: 15.11.2019).
10. Анализ уязвимостей компонентов АСУ ТП. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-vulnerabilities-2019/#3> (дата обращения: 15.11.2019).
11. Басыня Е.А. Распределенная система сбора, обработки и анализа событий информационной безопасности сетевой инфраструктуры предприятия // Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 25. № 4. С. 42–51.
12. Абзалов А.Р., Самигуллина Р.Р., Жиганов А.В. Аутентификация пользователей по динамике нажатий клавиш при использовании систем автоматического прокторинга // Прикладная информатика. 2019. Т. 14. № 6. С. 25–35.
13. Flior E., Kowalski K. Continuous biometric user authentication in online examinations. Proc. IEEE 7th Intern. Conf. Inform. Tech., 2010, pp. 488–492.
14. Peralta D., Triguero I., Garcia S., Herrera F., Benitez J.M. DPD-DFF: A dual phase distributed scheme with double fingerprint fusion for fast and accurate identification in large databases. Information Fusion, 2016, vol. 32, pp. 40–51. DOI: 10.1016/j.inffus.2016.03.002.
15. Nelasa A.V., Krischuk V.M. Using of the user identification methods on keyboard handwriting at digital signature shaping. Proc. 6th Intern. Conf., CADSM, 2001, pp. 239–240. DOI: 10.1109/CADSM.2001.975824.
16. Мухаматханов Р.М., Михайлов А.А., Баянов Б.И., Тумбинская М.В. Классификация DDos-атак на основе нейросетевой модели // Прикладная информатика. 2019. № 1. С. 96–103.
17. Самойлова Е.М. Построение экспертной системы поддержки принятия решения как интеллектуальной составляющей системы мониторинга технологического процесса // Вестн. ПНИПУ. 2016. Т. 18. № 2. С. 128–142.
18. Берман Г.Н. Сборник задач по курсу математического анализа. М.: Наука, 1977. 416 с.
19. Delattre M., Genon-Catalot V., Samson A. Mixtures of stochastic differential equations with random effects: application to data clustering. J. Stat. Plan. Inference, 2016, vol. 173, pp. 109–124.

**User authentication based on the keystroke dynamics in the process  
of using industrial control systems**

**M.V. Tumbinskaya**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Information Security Systems, [tumbinskaya@inbox.ru](mailto:tumbinskaya@inbox.ru)

**N.F. Asadullin**<sup>1</sup>, Student, [nail.asadullin.1997@mail.ru](mailto:nail.asadullin.1997@mail.ru)

**R.R. Murtazin**<sup>1</sup>, Student, [ramichhh@gmail.com](mailto:ramichhh@gmail.com)

<sup>1</sup> National Research Technical University, Kazan, 420111, Russian Federation

**Abstract.** There are modern industrial control systems ubiquitously. The complex architecture of such systems, the requirements of process continuity and access to the Internet make them easily vulnerable to cyber-criminals and cyber-attacks. Currently, there is no full protection for the components of industrial automated control systems, so there is a need for adequate protection and increasing the information security level.

As the domain knowledge analysis shows, 82 % of industrial enterprises cannot resist the internal intruder, who seeks to penetrate the technological network from the corporate network, after gaining access to the network technological segment, the attacker has wide opportunities for malicious influence on the components of industrial control systems. In 2018, the number of new vulnerabilities in the industrial control system components increased by 30 % compared to 2017. A significant proportion of vulnerabilities in industrial control systems have an association with incorrect authentication or excessive user access rights. Moreover, more than half of the vulnerabilities can be exploited remotely.

The paper presents an overview of information security vulnerabilities of industrial automated systems. Based on the analysis of the subject area, the authors propose a three-level model for improving the accuracy of user authentication based on the keystroke dynamics, which will increase the security level of automated control systems. The authors conducted an experimental study, the results of which showed a high ability of the proposed model for access differentiation for legal users and hackers, taking into account minor changes in the keystroke dynamic parameters, to increase the user authentication accuracy. The user authentication authenticity in practice was 97.5 %.

**Keywords:** authentication accuracy, typing biometrics, keystroke dynamics, biometrics, authentication, clustering.

### References

1. Teslenko P.A., Barskaya I.S., Chumachenko E.A. The project of creating an automated container terminal management system. *Modern Information and Electronic Technologies*, 2013, vol. 1, no. 14, pp. 74–77 (in Russ.).
2. Alferov V.P., Drovnikova I.G., Obukhova L.A., Rogozin E.A. The verbal model of managing a weakly vulnerable process of delimiting user access to software tools of an electronic document management system. *Bull. DSTU*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 37–49 (in Russ.).
3. Kostyuchenko E. Yu., Meshcheryakov R.V. User recognition by keyboard handwriting on a fixed passphrase in computer systems. *News SFU*, 2003, no. 4, pp. 177–178 (in Russ.).
4. Tumbinskaya M.V., Bayanov B.I., Rakhimov R.Zh., Kormiltcev N.V., Uvarov A.D. Analysis and forecast of undesirable cloud services traffic. *Business Informatics*, 2019, no. 1, pp. 71–81 (in Russ.). DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.71.81.
5. Sharipov R.R., Tumbinskaya M.V., Abzalov A.R. Analysis of users keyboard handwriting based on Gaussian reference signals. *Proc. Intern. RusAutoConf.*, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867753.
6. Sharipov R.R., Safiullin N.Z. Hardware analysis of keyboard script by using the reference gaussian signals. *Bull. KSTU*, 2006, no. 2, pp. 21–23 (in Russ.).
7. D’Lima N., Mittal J. Password authentication using keystroke biometrics. *Proc. IEEE Intern. Conf. ICCICT*, Mumbai, 2015, pp. 1–6.
8. *Industrial Companies: Attack Vectors*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-attacks-2018/> (accessed November 15, 2019).
9. *Vulnerability Analysis of ICS Components*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-vulnerabilities-2019/> (accessed November 30, 2019).
10. *Vulnerability Analysis of ICS Components*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-vulnerabilities-2019/#3> (accessed November 15, 2019).
11. Basyunya E.A. Distributed system for the collection, processing and analysis of information security events network infrastructure of the enterprise. *Information Technology Security*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 42–51 (in Russ.).
12. Abzalov A.R., Samigullina R.R., Zhiganov A.V. Authentication of users by the dynamics of keystrokes when using automatic proctoring systems. *Applied Informatics*, 2019, vol. 14, no. 6, pp. 25–35 (in Russ.).
13. Flior E., Kowalski K. Continuous biometric user authentication in online examinations. *Proc. IEEE 7th Intern. Conf. Inform. Tech.*, 2010, pp. 488–492.
14. Peralta D., Triguero I., Garcia S., Herrera F., Benitez J.M. DPD-DFF: A dual phase distributed scheme with double fingerprint fusion for fast and accurate identification in large databases. *Information Fusion*, 2016, vol. 32, pp. 40–51. DOI: 10.1016/j.inffus.2016.03.002.
15. Nelasa A.V., Krischuk V.M. Using of the user identification methods on keyboard handwriting at digital signature shaping. *Proc. 6th Intern. Conf., CADSM*, 2001, pp. 239–240. DOI: 10.1109/CADSM.2001.975824.

16. Mukhamatkhonov R.M., Mikhaylov A.A., Bayanov B.I., Tumbinskaya M.V. Classification of DDos attacks based on a neural network model. *Applied Informatics*, 2019, no. 1, pp. 96–103 (in Russ.).
17. Samoylova E.M. Construction of an expert decision support system as an intellectual component of a process monitoring system. *Bull. PNRPU*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 128–142 (in Russ.).
18. Berman G.N. *Collection of Tasks on the Course of Mathematical Analysis*. Moscow, 1977, 416 p. (in Russ.).
19. Delattre M., Genon-Catalot V., Samson A. Mixtures of stochastic differential equations with random effects: application to data clustering. *J. Stat. Plan. Inference*, 2016, vol. 173, pp. 109–124.

#### Для цитирования

Тумбинская М.В., Асадуллин Н.Ф., Муртазин Р.Р. Моделирование аутентификации пользователей по динамике нажатий клавиш в промышленных автоматизированных системах // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 266–275. DOI: 10.15827/0236-235X.130.266-275.

#### For citation

Tumbinskaya M.V., Asadullin N.F., Murtazin R.R. User authentication based on the keystroke dynamics in the process of using industrial control systems. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 266–275 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.266-275.

УДК 004.584:004.891.2  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.276-282

Дата подачи статьи: 10.03.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 276–282

## **Контекстное ранжирование ответов по относительным метрикам в диалоговых системах помощи пользователям**

Н.Р. Гафуров<sup>1</sup>, аспирант, [nail@gafurov.ru](mailto:nail@gafurov.ru)

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

Предметом исследования являются диалоговые системы помощи пользователям веб-приложений или онбординг-системы.

Рассматриваются диалоговые системы в целом, вероятные причины их текущей актуализации, условия целесообразности применения, их виды и обосновывается выбор вида для описываемой системы.

Исследованы системы помощи, порождающие необходимость отвечать на вопросы пользователей исходя из обозреваемого в данный момент раздела или страницы веб-приложения, помимо учета семантической релевантности ответа запросу. При этом остается потребность в составлении универсальных ответов без учета дополнительных условий, относящихся ко всем страницам веб-приложения, для сокращения используемых объемов хранилищ данных и ускорения обработки поступающих запросов.

В статье описываются статус-кво в области алгоритмов ранжирования, условия систем помощи для применения алгоритмов ранжирования и разработанный алгоритм контекстного ранжирования ответов по относительным метрикам в диалоговых системах помощи пользователям, приводится пример применения алгоритма.

Целью статьи является описание алгоритма ранжирования ответов на запросы пользователей в соответствии с контекстом запроса в диалоговых системах, основанных на списках ответов.

Данный алгоритм рекомендуется применять в диалоговых системах, основанных на списках, в которых релевантность запроса пользователя и ответов из списка основана не только на семантической близости запроса и ответа, но и на релевантности условий применения ответа из списка и условий, в которых пользователь находится в момент запроса. К таким системам, помимо систем помощи пользователям, относятся системы, работающие по принципу «обмен сообщениями как интерфейс» (messaging-as-an-interface). В заключении статьи обозначены перспективные направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** диалоговые системы, вопросно-ответные системы, обработка естественного языка, искусственный интеллект, ранжирование, обмен сообщениями как интерфейс.

Диалоговые системы активно применяются для оказания информационных услуг во многих сферах, и сейчас часто используется подход «обмен сообщениями как интерфейс» (messaging-as-an-interface), при котором в качестве интерфейса системы выступает чат-бот. Актуальности различных видов диалоговых систем в общем и диалоговых систем, основанных на естественном языке, в частности, посвящены работы [1–3].

Выбор такого подхода может быть обусловлен необходимостью снижения порога для входа пользователя. То есть классические инструменты интерфейсов с множеством элементов управления (кнопки, поля ввода, формы загрузки и т.д.) значительно эффективнее применять в простых системах, например, в системах, состоящих из одного окна интер-

фейса, однако при увеличении сложности системы и необходимости переходить из одного окна к другому в поиске требуемой функции целесообразнее использовать диалоговый режим, когда достаточно указать команду в поле ввода сообщения. Тем более, что при возможности ввода команд в свободной (естественно-языковой) форме не требуются изучение и запоминание большого объема справочной информации, инструкций по системе.

Использование диалоговой системы целесообразно в сложных программах, где велики затраты времени на изучение инструкций. Под сложной программой понимается программный продукт, в котором содержится множество окон или страниц с множеством функций. Так как определение степени сложности системы не является задачей статьи, данный

аспект здесь не рассматривается. О важности эффективности интерфейса человек–машина говорится в работах [4–6].

По методам, используемым для порождения ответов, диалоговые системы можно разделить на следующие типы (в соответствии с работой [7]):

- системы, основанные на правилах, когда ответ на запрос пользователя формируется на основе заранее заданного шаблона или правила;

- системы, основанные на заданном списке ответов, которые ответы на заданные пользователем сообщения выбирают из подготовленного заранее набора;

- системы, основанные на порождающих моделях и генерирующие ответ с помощью некоторой порождающей модели.

Поскольку в данной статье речь идет о диалоговых системах помощи пользователям сложных веб-приложений, использование системы на порождающих моделях не рационально в силу предварительно заданных функций веб-приложения, которые либо можно описать в заранее заданном наборе, либо сформировать правила для их поиска.

В статье рассматривается универсальная система, позволяющая специалистам с низкой квалификацией адаптироваться под любые веб-приложения. Использование систем, основанных на правилах, приводит к затруднениям, так как это более сложный для изучения подход, требующий от специалиста, создающего сценарий обучения и подсказок, знания многих аспектов задания правил. Использование системы, основанной на заданном списке ответов, является более подходящим выбором, так как от специалиста требуется лишь пополнять список, состоящий из вопросов и ответов на естественном языке.

### Системы помощи

В настоящее время получили развитие такие сервисы внедрения и обучения пользователей сложных программных продуктов, как WalkMe, WhatFix, Pendo, Appcues. Они помогают пользователям разобраться в сложном ПО, пошагово указывая на элементы интерфейса, с которыми ему нужно взаимодействовать в ходе исполнения профессиональных обязанностей. О пользе от внедрения подобного ПО говорится в работе [8].

При реализации таких сервисов в формате диалоговых систем возникает сложность с контекстной зависимостью ответа на запрос пользователя от того окна или той страницы приложения, где он сейчас находится. Например, при запросе «Как зарегистрировать аккаунт?» пользователь может иметь в виду регистрацию личного аккаунта в социальной сети, если он находится на главной странице социальной сети, либо регистрацию аккаунта компании, если он уже вошел в личный аккаунт ранее. Таким образом, необходимо ранжировать сценарии помощи в зависимости от релевантности запросу (точность поиска по запросу, соответствие смыслу запроса) и от контекста задаваемого вопроса (расположения пользователя в системе) и выдавать результат с наивысшим рангом. В примере приведен случай, когда необходимо реагировать на адрес страницы, на которой находится пользователь, но, помимо этого, могут обрабатываться и другие параметры: содержание cookie, история переходов, о чем речь идет в работе [9] и других. Также важным моментом, который не рассматривается в данной статье, является реакция на факты, выявленные в ходе диалога с пользователем, о чем упоминается в [10].

### Алгоритм ранжирования

Большое значение алгоритмы ранжирования имеют в поисковых системах, так как ранжирование выдаваемой информации – один из критериев эффективности их работы. Такой же вывод можно сделать из работ [9, 11]. Актуальные алгоритмы ранжирования поисковых систем закрыты, поскольку они являются коммерческой тайной, интеллектуальной собственностью компаний-разработчиков систем. Закрытость алгоритмов ранжирования защищает поисковую систему от мошеннического продвижения сайтов в данной поисковой системе, так как в соответствии с законом Гудхарта или законом Кэмпбелла, приведенными в [12], известность алгоритма оценки приводит к профанации данных метрик.

На текущий момент ранжирование является актуальной проблемой [13, 14]. Как следует из работ [14, 15], сложно выделить алгоритм ранжирования из алгоритма поиска – часто такие алгоритмы описываются в комплексе. Авторы [13] приводят следующие модели поиска и ранжирования: булева модель, векторно-пространственная модель, вероятностная модель. Они называют недостатки этих моделей и рас-

сравнивают использование коэффициента корреляции, решают задачи повышения быстродействия и снижения требований к аппаратной части систем.

В данной статье затрагиваются вопросы использования относительных метрик для ранжирования ответов в диалоговых системах помощи, то есть недостатки рассмотренных систем остаются актуальными для рассматриваемой предметной области, а имеющиеся алгоритмы их не решают. Эта задача выявлена в ходе разработки автором сервиса онбординга – системы создания обучающих сценариев для новых пользователей веб-приложений.

Исходя из внедряемого посредством системы веб-приложения, набор функций имеет конечное количество. Ответ из набора выбирается в соответствии с метриками релевантности. В связи с использованием множества метрик для определения степени релевантности запроса пользователя вариантам ответов, хранящихся в БД системы, и необходимостью определить единственный наиболее релевантный вариант изначально используется ранжирование самих метрик, чтобы снизить вероятность коллизий релевантностей.

Ранжирование метрик оценки результата по важности или по степени релевантности к рассматриваемой сфере – часто нетривиальная задача из-за сложности подбора метрик оценки самих метрик, но возможно использование не количественных, а качественных показателей (например, какая из сравниваемых метрик более релевантна требованиям системы). Также периодически такие метрики не имеют коррелирующих единиц измерения для других метрик. Для ее решения можно использовать эвристический подход: составить список всех метрик и воспользоваться алгоритмом сортировки (например, сортировки Хоара) для ранжирования списка по относительному показателю степени релевантности метрики требованиям системы. Это применительно на подготовительном этапе системы, когда составляется список метрик релевантности. В соответствии с рангом метрикам выставляются их приоритеты. Приоритеты метрик будут использоваться как множители значений этих метрик сравниваемых результатов – это механизм использования приоритетов метрик в расчетах ранга сравниваемых ответов пользователю.

Так как метрики могут отличаться по порядку значений, необходимо использовать не абсолютные их значения, а относительные:

сравнивать результаты по каждой метрике между собой и учитывать результат этого сравнения. Тогда значения всех метрик, даже не имеющих количественных выражений, будут соизмеримы и влияние на разницу между метриками будет иметь только выбранный приоритет метрики.

В качестве значений приоритетов и метрик результатов можно использовать дробные числа – это позволит расставлять значения сразу в момент сравнения метрик или результатов по этим метрикам, так как дробные значения могут дробиться до бесконечности, а выбрать целое число между целыми числами периодически бывает невозможно. То есть, вместо того чтобы сначала отсортировать значения, а потом присвоить им численные представления ранга, можно назначить начальное значение ранга первому выбранному элементу и присваивать значения остальным относительно первого выбранного элемента. Для приоритетов это может быть число 0,5. В качестве изначального значения первого сравниваемого результата предлагается брать значение приоритета метрики: это приведет к лавинообразному росту разницы между значениями разных метрик и снизит вероятность коллизий.

Итоговая форма представления сравниваемых ответов (результатов) и их метрик приведена в таблице 1.

Таблица 1

**Представление сравниваемых результатов и их метрик**

Table 1

**The compared results' presentation and their metrics**

| Метрика         | Приоритет | Результат |           |     |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|
|                 |           | 1         | 2         | ... | M         |
| 1               | $p[1]$    | $v[1][1]$ | $v[2][1]$ | ... | $v[M][1]$ |
| 2               | $p[2]$    | $v[1][2]$ | $v[2][2]$ | ... | $v[M][2]$ |
| ...             | ...       | ...       | ...       | ... | ...       |
| $N$             | $p[N]$    | $v[1][N]$ | $v[2][N]$ | ... | $v[M][N]$ |
| Ранг результата | –         | $r[1]$    | $r[2]$    | ... | $r[M]$    |

Для повышения порядковой разницы значения метрик каждого результата перемножаются с приоритетами соответствующих метрик, это позволяет задать приоритет значений разных метрик для каждого результата. Далее значения метрик каждого результата складываются. Таким образом, ранг релевантности результата  $i$  или  $r[i]$  равен  $r[i] = \sum_{j=1}^N v[i][j] \times p[j]$ .



где  $v[i][j]$  – значение метрики  $j$  результата  $i$ ;  $p[j]$  – значение приоритета метрики  $j$ .

При подобной работе гипотетически возможны коллизии. Для их устранения также предлагается алгоритмическое решение. Если коллизия возникла на максимальном значении ранга, все результаты с максимальным рангом поочередно сравниваются по метрикам от самой приоритетной метрики к наименее приоритетной. Результат с первым найденным высшим значением метрики считается результатом с более высоким приоритетом. Гипотетически возможна ситуация полного совпадения, тогда предлагается брать результат, значение которого стоит выше при сортировке по алфавиту. Либо необходимо исключить возможность равенства значений метрик для результатов, то есть при сравнении метрик допускать только условия «более релевантно» или «менее релевантно» без возможности равенства релевантностей. При таком подходе коллизия будет устраняться за один шаг.

#### Пример использования алгоритма

Для примера выбран запрос пользователя на создание аккаунта компании в социальной сети ВКонтакте: «Как создать аккаунт». Данный запрос сделан, когда пользователь находился на одной из внутренних страниц социальной сети, то есть уже вошел в свой личный аккаунт и, вероятнее всего, имел в виду создание корпоративного аккаунта. Это упрощенный пример для иллюстрации работы алгоритма.

В качестве метрик простейшего представления системы помощи пользователям выступают релевантность запроса пользователя возможным запросам, хранящимся в БД, и релевантность веб-страницы, на которой находится пользователь. Метрика релевантности страницы, на которой находится пользователь, имеет больший приоритет, так как важнее, на какой из страниц осуществляется подобный запрос, нежели качество распознавания запроса. В соответствии с представленными условиями составлена таблица 2.

Полученные результаты показывают, что у сценария «Создать аккаунт компании» большее значение ранга, значит, необходимо запустить данный сценарий помощи пользователю.

Таблица 2

#### Пример представления сравнимых результатов и их метрик

Table 2

#### The presentation example of the compared results and their metrics

| Метрика                | Приоритет | Создать аккаунт компании | Создать личный аккаунт |
|------------------------|-----------|--------------------------|------------------------|
| Релевантность страницы | 0,6       | 0,7                      | 0,6                    |
| Релевантность запроса  | 0,5       | 0,4                      | 0,5                    |
| Ранг результата        | –         | 0,62                     | 0,61                   |

#### Заключение

В статье представлен обзор разработанного алгоритма для ранжирования вариантов ответов на запрос пользователя. Алгоритм ранжирования применим не только в системах помощи пользователям, но и в других системах сравнения объектов по множеству не коррелирующих между собой метрик, при этом метрики могут не иметь численного представления, то есть быть качественными, а не количественными. Данный алгоритм решает поставленную задачу.

При дальнейшей работе можно рассмотреть влияние фактов, выявленных в ходе диалога с пользователем, на релевантность ответов запросам, о чем упоминается в [10]. Возможны оптимизация работы с коллизиями, оптимизация процесса присвоения значений приоритетов и значений метрик, сравнения различных алгоритмов присвоения значений метрик результатам, влияние выделения терминологии на качество ранжирования, эффективность чего показана в работе [11]. Следует рассмотреть автоматизацию построения ранжирующей функции исходя из множества параметров, что, как следует из [9], является актуальным. Также возможны исследование применения данного алгоритма ранжирования в других задачах и сравнение с другими алгоритмами ранжирования в сферах, где такое сравнение осуществимо. Важным направлением является реализация алгоритма с использованием современных достижений техники и оценкой влияния, например, бессерверной архитектуры на эффективность работы, о чем говорится в [16].

**Литература**

1. Gafurov N.R., Bessmertny I.A., Platonov A.V., Poleshchuk E.A., Vasiliev A.V. Named entity recognition through bidirectional lstm in natural language texts obtained through audio interfaces. Proc. 12th IEEE Intern. Conf. AICT, Almaty, Kazakhstan, 2018, pp. 74–77.
2. Бессмертный И.А., Посевкин Р.В. Естественно-языковой пользовательский интерфейс диалоговой системы // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 5–9. DOI: 10.15827/0236-235X.115.005-009.
3. Крайванова В.А. Модель естественно-языкового интерфейса для систем управления сложными техническими объектами и оценка эффективности алгоритмов на ее основе // Управление большими системами. Вып. 26. 2009. С. 158–178.
4. Kujala S., Roto V., Väänänen-Vainio-Mattila K., Karapanos E., Sinnelä A. UX Curve: a method for evaluating long-term user experience. *Interacting with Computers*, 2011, vol. 23, no. 5, pp. 473–483. DOI: 10.1016/j.intcom.2011.06.005.
5. Marcus A. Design, user experience, and usability: Design discourse. Proc. 4th Intern. Conf. DUXU, 2015, 672 p.
6. Ахметов К. Взаимодействие человека и компьютера: тенденции, исследования, будущее // Форсайт. 2013. Т. 7. № 2. С. 58–68.
7. Чистова Е.В., Шелманов А.О., Смирнов И.В. Применение глубокого обучения к моделированию диалога на естественном языке // Тр. ИСА РАН. 2019. Т. 69. № 1. С. 105–115. DOI: 10.14357/20790279190110.
8. Lepofsky A. Digital Adoption Platforms: a new breed of software helps improve user adoption of new technologies. Constellation Research, 2017. URL: <https://blog.walkme.com/wp-content/uploads/2017/05/20170512-CR-A-LEPOFSKY-DIGITAL-ADOPTION-PLATFORMS-FINAL-1-1.pdf> (дата обращения: 15.08.2019).
9. Николенко С.И., Фишков А.А. Обзор моделей поведения пользователей для задачи ранжирования результатов поиска // Тр. СПИИРАН. 2012. Вып. 22. С. 139–175.
10. Bessmertny I. On constructing intellectual systems in ternary logic. *Programming and Computer Software*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 43–46.
11. Заикин Д.А. Подход к ранжированию результатов для терминологического поиска на основе меры близости строк // Ученые записки Казан. ун-та. 2014. Т. 156. С. 12–21.
12. Форум: Прикладная наукометрия // Антропологический форум. 2019. № 40. С. 11–84. URL: <http://anthropologie.kunstkamera.ru/files/pdf/040/forum.pdf> (дата обращения: 15.08.2019). DOI: 10.31250/1815-8870-2019-15-40-11-84.
13. Кучукова Н.Н., Вершков Н.А. Математическая модель подсистемы поиска и ранжирования документов в информационно-поисковых системах // Научные ведомости БелГУ. 2018. № 1. С. 176–183.
14. Брицов Р.А. Повышение качества информационного поиска за счет совершенствования ранжирования и использования особенностей поведения пользователей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 2. С. 63–66.
15. Brin S., Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1998, vol. 30, iss. 1–7, pp. 107–117.
16. Yan M., Castro P., Cheng P., Ishakian V. Building a chatbot with serverless computing. Proc. 1st Intern. Workshop on Mashups of Things and APIs MOTA, 2016, pp. 1–4.

**Response contextual ranking on relative metrics in dialogue assistance systems for users**

*N.R. Gafurov*<sup>1</sup>, *Postgraduate Student, nail@gafurov.ru*

<sup>1</sup>*The National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation*

**Abstract.** The subject of this paper is dialogue systems for assisting users of web applications or onboarding systems.

The paper contains dialog systems in general, the probable reasons for their current updating, the conditions for their feasibility, their types, and justifies the choice of the type for the described system.

We have studied the help systems that make it necessary to answer users' questions based on the currently viewed section or a web application page, in addition to taking into account the semantic relevance of the response to the query.

At the same time there remains the need to give universal answers without taking into account additional conditions that apply to all pages of a web application to reduce the amount of data storage used and speed up the processing of incoming requests.

The paper describes the status quo in the ranking algorithm field, the system conditions of assisting users for applying ranking algorithms and describes the developed algorithm for response contextual ranking by relative metrics in dialogue systems for assisting users provides the algorithm application example.

The paper's purpose is to describe the algorithm for ranking responses to user requests in accordance with the request context in dialogue systems based on answer lists.

This algorithm is for use in dialogue systems based on lists in which the user's request relevance and responses from the list are based not only on the request semantic proximity and response but also on the condition relevance for applying the response from the list and the conditions in which the user is at the time of the request. Such systems in addition to user assistance systems, include systems operating on the "messaging-as-an-interface" principle. The paper also gives promising areas for further research.

**Keywords:** dialogue systems, question-answer systems, natural language processing, artificial intelligence, ranking, messaging as an interface.

### References

1. Gafurov N.R., Bessmertny I.A., Platonov A.V., Poleshchuk E.A., Vasiliev A.V. Named entity recognition through bidirectional lstm in natural language texts obtained through audio interfaces. *Proc. 12th IEEE Intern. Conf. AICT*, Almaty, Kazakhstan, 2018, pp. 74–77.
2. Bessmertny I.A., Posevkin R.V. Natural language user interface of a dialogue system. *Software & Systems*, 2016, no. 3, pp. 5–9. DOI: 10.15827/0236-235X.115.005-009 (in Russ.).
3. Krayvanova V.A. Model of natural-language interface for complex technical objects control systems and efficiency evaluation of model-based algorithms. *Large-Scale Systems Control*, 2009, iss. 26, pp. 158–178 (in Russ.).
4. Kujala S., Roto V., Väänänen-Vainio-Mattila K., Karapanos E., Sinnelää A. UX Curve: a method for evaluating long-term user experience. *Interacting With Computers*, 2011, vol. 23, no. 5, pp. 473–483. DOI: 10.1016/j.intcom.2011.06.005.
5. Marcus A. Design, user experience, and usability: Design discourse. *Proc. 4th Intern. Conf. DUXU*, 2015, 672 p.
6. Akhmetov K. Human-computer interaction: Trends, research, future. *Foresight and STI Governance*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 58–68 (in Russ.).
7. Chistova E.V., Shelmanov A.O., Smirnov I.V. Natural language dialogue modelling with deep learning. *Proc. of the Institute for Systems Analysis Rus. Academy of Sc.*, 2019, vol. 69, no. 1, pp. 105–115. DOI: 10.14357/20790279190110 (in Russ.).
8. Lepofsky Alan. Digital adoption platforms: A new breed of software helps improve user adoption of new technologies. *Constellation Research*, 2017. Available at: <https://blog.walkme.com/wp-content/uploads/2017/05/20170512-CR-A-LEPOFSKY-DIGITAL-ADOPTION-PLATFORMS-FINAL-1-1.pdf>. (accessed August 15, 2019).
9. Nikolenko S.I., Fishkov A.A. A survey of user behaviour models for search results ranking. *Proc. SPIIRAN*, 2012, iss. 22, pp. 139–175 (in Russ.).
10. Bessmertny I. On constructing intellectual systems in ternary logic. *Programming and Computer Software*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 43–46.
11. Zaikin D.A. A string proximity-based approach to result ranking for terminological search. *Sc. Research in KFU*, 2014, vol. 156, pp. 12–21 (in Russ.).
12. *Forum for Anthropology and Culture*. 2019, no. 40, pp. 11–84. Available at: <http://anthropologie.kunstkamera.ru/files/pdf/040/forum.pdf> (accessed August 15, 2019). DOI: 10.31250/1815-8870-2019-15-40-11-84.
13. Kuchukova N.N., Vershkov N.A. Mathematical model of subsystem of document retrieval and ranking in information-retrieval systems. *Belgorod State University Sc. Bull.*, 2018, no. 1, pp. 176–183. DOI: 10.18413/2411-3808-2018-45-1-176-183 (in Russ.).

14. Britsov R.A. Improvement of quality of the information search based on ranking rationalization and users' behavioristic characteristics. *T-Comm*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 63–66 (in Russ.).

15. Brin S., Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1998, vol. 30, iss. 1–7, pp. 107–117.

16. Yan M., Castro P., Cheng P., Ishakian V. Building a chatbot with serverless computing. *Proc. 1st Intern. Workshop on Mashups of Things and APIs MOTA*, 2016, pp. 1–4.

#### Для цитирования

Гафуров Н.Р. Контекстное ранжирование ответов по относительным метрикам в диалоговых системах помощи пользователям // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 276–282. DOI: 10.15827/0236-235X.130.276-282.

#### For citation

Gafurov N.R. Response contextual ranking on relative metrics in dialogue assistance systems for users. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 276–282 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.276-282.

УДК 004.41  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.283-296

Дата подачи статьи: 30.01.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 283–296

## **Анализ методов интеграции для разработки информационно-аналитических систем по свойствам неорганических соединений**

В.А. Дударев<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, [vdudarev@hse.ru](mailto:vdudarev@hse.ru)  
И.О. Темкин<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, [igortemkin@yandex.ru](mailto:igortemkin@yandex.ru)  
В.Ф. Корнюшко<sup>3</sup>, д.т.н., профессор, [vfk256@mail.ru](mailto:vfk256@mail.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, 109028, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, 119049, Россия

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, 119454, Россия

В статье рассматривается применение системного анализа для формализации информационных процессов, протекающих в интегрируемых информационных системах, и разработки системы рекомендаций для выбора одного из методов интеграции при решении практических задач консолидации информационных систем.

Анализ начинается с выделения базовых информационных процессов, протекающих в локальных информационных системах, затем идет наблюдение за их трансформацией в интегрированных системах, построенных с использованием трех методов консолидации: интеграции корпоративных приложений (Enterprise Application Integration, EAI), интеграции корпоративной информации (Enterprise Information Integration, EII) и ПО для извлечения, преобразования и загрузки данных (Extract, Transform, Load – ETL), основанного на технологии хранилищ данных.

Осуществлен синтез обобщенной схемы методов интеграции гетерогенных информационных систем, и на ее основе выполнено сравнение методов с использованием десяти критериев. По итогам сравнения предложены рекомендации по выбору предпочтительного метода интеграции гетерогенных информационных систем.

Отмечается возможность совместного использования методов ETL и EII для достижения оптимальной скорости работы источника интегрированных данных. Поскольку ни один из методов не покрывает всех потребностей, возникающих при консолидации информационных систем, предлагается методология их совместного использования для наиболее тесной интеграции информационных систем.

Кратко рассматриваются результаты практического применения разработанной методологии интеграции для консолидации информационных систем в области неорганического материаловедения, как отечественных, так и зарубежных: описывается набор созданных web-сервисов, являющихся основным техническим средством, обеспечивающим взаимодействие распределенных кроссплатформенных информационных систем по свойствам неорганических веществ для консолидации данных, и пользовательский интерфейс единой точки входа [www.imet-db.ru](http://www.imet-db.ru), позволяющий любому пользователю осуществлять поиск и просмотр информации по свойствам содержащихся в интегрируемых информационных системах веществ.

**Ключевые слова:** информационный процесс, интеграция данных, интеграция приложений, сравнение методов интеграции, критерий выбора метода интеграции.

Задача интеграции информации в настоящее время актуальна для многих организаций, поскольку позволяет повысить эффективность работы. Этим объясняется большой интерес к данному направлению развития информационных технологий и появление множества новых программных продуктов, направленных на решение задач интеграции. Однако зачастую компании по-разному понимают интеграцию и, следовательно, по-разному подходят к решению задач интеграции. Это происходит на фоне

еще не вполне четко сформировавшегося, размытого терминологического аппарата. Необходимость разьяснения сути методов интеграции и их преимуществ привела в июле 2001 года к созданию лидерами в области интеграции международного консорциума по интеграции (Integration Consortium – IC). Следует отметить, что до мая 2004 года у консорциума IC было другое название – консорциум отрасли интеграции корпоративных приложений (EAI Industry Consortium – EAIIC), которое изме-

нили, поскольку консорциум занимался всеми вопросами интеграции, а EAI является лишь одним из методов интеграции. В настоящее время IC – это международная некоммерческая организация, объединяющая более 50 компаний из различных стран мира. В работе IC принимают участие не только поставщики программного и аппаратного обеспечения и системные интеграторы, но и потребители методов интеграции, представители научных кругов. Поскольку IC задумывался как сообщество, целью которого является единение отрасли интеграции, все члены консорциума могут совместно определять проблемы и разрабатывать решения. По сути роль консорциума IC в сфере интеграции эквивалентна роли консорциума W3C в области web-технологий.

В данной работе авторы придерживаются термина «метод интеграции» вместо «технологии интеграции», так как его использование более уместно при разработке методологии интеграции *информационных систем* (ИС) по свойствам неорганических веществ, используемой для консолидации информационных ресурсов в области неорганического материаловедения. Методология рассматривается как система методов исследований, в данной работе – методов (или технологий) интеграции. А метод является набором методик, то есть совокупностью приемов практической реализации.

В настоящее время происходит не только становление терминологической базы в области интеграции, но и развитие самих интеграционных подходов. Обычно выделяют три метода интеграции: интеграция корпоративных приложений (Enterprise Application Integration, EAI), интеграция корпоративной информации (Enterprise Information Integration, EII) и ПО для извлечения, преобразования и загрузки данных (Extract, Transform, Load – ETL). Вследствие этого наблюдается некоторая неоднозначность относительно того, каковы функции каждого из трех описанных методов и в каких случаях тот или иной метод должен использоваться. Необходимо четко представлять возможности каждого метода и определять класс задач, для решения которых он подходит. Для понимания различий в назначении методов интеграции необходимо привести соответствующие определения, учитывающие их назначение [1].

- **EAI** – метод интеграции, с помощью которого организация добивается централизации и оптимизации интеграции корпоративных приложений, обычно используя те или иные формы оперативной доставки информации

(push technology), которая управляется внешними событиями (event-driven).

- **ETL** – метод интеграции, с помощью которого данные из операционной среды, включающей гетерогенные технологии, преобразуются (обычно путем их пакетной обработки) в интегрированные, согласующиеся между собой данные, пригодные для использования в процессе поддержки принятия решений. Метод ETL ориентирован на консолидацию разнородных БД в виде, например, хранилища данных, витрины или операционного склада данных.

- **EII** – метод интеграции в режиме реального времени несопоставимых типов данных из многочисленных источников как внутри, так и за пределами организации. Инструменты EII обеспечивают универсальный уровень доступа к данным и используют технологию поиска информации (pull technology) или возможности работы по запросам.

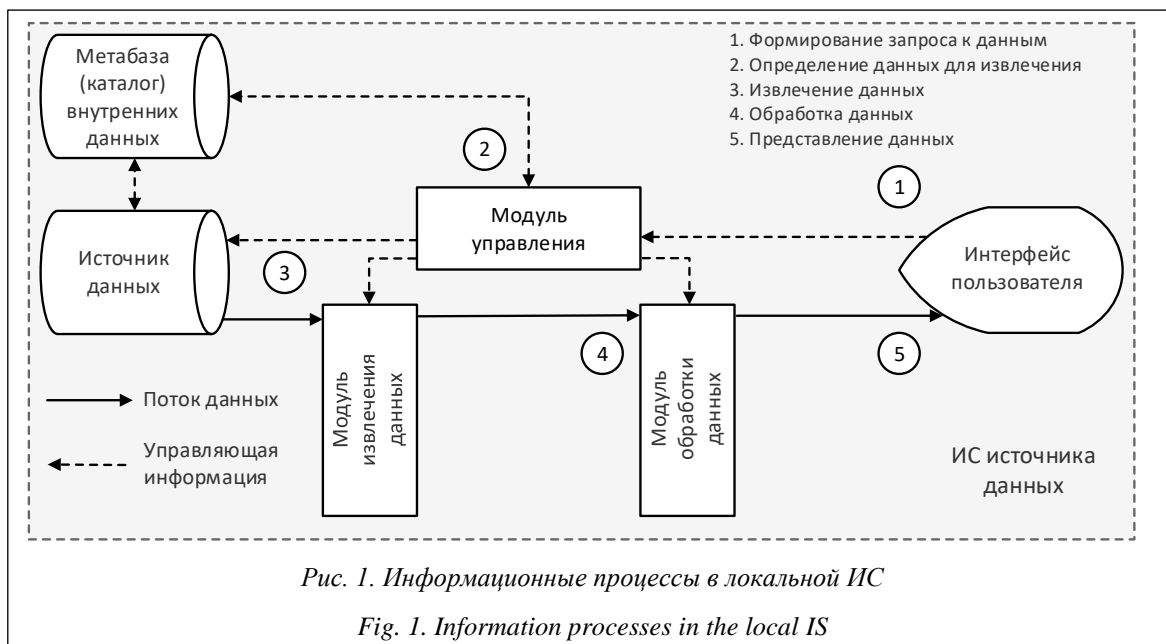
Для более полного понимания этих методов необходимо рассмотреть их взаимосвязь в рамках уже существующей информационной инфраструктуры организации.

#### Базовые информационные процессы в локальных ИС

Типовая структура ИС включает в себя ряд подсистем, реализующих базовые информационные процессы сбора, хранения, передачи, обработки и представления информации. На рисунке 1 представлены информационные процессы, протекающие в локальной ИС. В ней реализуются все основные процессы (кроме информационного обмена с внешними ИС).

Запрос пользователя, сформированный при помощи интерфейса (1), поступает в модуль управления, который на основе метаданных (2) обращается к подсистеме хранения данных. Далее выполняются непосредственное извлечение (3) и обработка данных (4). Результаты отображаются пользователю при помощи интерфейса (5).

Переход от локальной БД к распределенной, но однородной базе требует минимальных изменений в схеме обработки информации. Метабаза должна быть дополнена сведениями о распределении данных по множественным источникам. Наличие гетерогенных ИС, обладающих различными форматами хранения данных и различными процессами их обработки, обуславливает необходимость модификации процессов обмена информацией и требует применения того или иного метода интеграции ИС.



Создание централизованной ИС, как правило, является сложной задачей даже в рамках одной крупной научно-исследовательской организации. Это обусловлено использованием различных информационных комплексов для сбора и регистрации данных, а также спецификой и разнообразием исследований. Поэтому проблема создания систем интеграции информации, способных объединить всю важную информацию, накопленную исследователями данной организации, актуальна при создании практически любой централизованной ИС.

При переходе к интегрированным ИС необходимо прежде всего ответить на следующие вопросы:

- какие подсистемы интегрированной ИС будут распределенными, а какие останутся локальными;
- какие подсистемы интегрированной ИС станут (изначально или в перспективе) гетерогенными, а какие останутся однородными;
- каков будет баланс между централизацией и периферийностью в системе управления интегрированной ИС.

В первом приближении можно сказать, что методы ЕП и ЕТL основаны на использовании источников данных, а метод ЕАI предполагает распределенную обработку сообщений.

Выбор метода интеграции определяет характеристики, которыми будет обладать интегрированная система. В контексте конкретной задачи по интеграции характеристики могут являться как недостатками, так и положительными свойствами, позволяющими решить дан-

ную задачу наиболее оптимально и эффективно.

Основной задачей при разработке централизованных систем является стандартизация, которой подвергаются все подсистемы, входящие в состав централизованной системы. В свою очередь, стандартизация подсистем и информационных потоков между ними осуществляется на основе собранной информации о взаимодействии всех составных частей, образующих ИС [2].

### Метод интеграции корпоративной информации ЕП

Интеграция корпоративной информации – это интеграция данных из многочисленных систем в унифицированное, согласованное и точное представление, предназначенное для изучения и обработки данных [3].

При организации процесса интеграции данных по технологии ЕП главным функциональным модулем является предметный посредник (иногда называемый модулем извлечения), который обеспечивает единый интерфейс взаимодействия конечных приложений с источниками исходной информации, поиск запрашиваемой информации по исходным БД и агрегацию собранной информации для передачи конечным приложениям.

Взаимодействие с источниками хранения исходных данных осуществляется за счет адаптеров – модулей преобразования форматов данных.

Схема интеграции разнородных источников данных на основе метода интеграции корпоративной информации показана на рисунке 2.

Конечные приложения инициируют запросы, определяющие характер и объем интегрируемых данных. Для взаимодействия между предметным посредником и приложениями используется единый, стандартизированный в рамках данной системы интеграции данных интерфейс для прикладных программ (Application Programming Interface, API).

Предметный посредник определяет, к каким источникам данных необходимо обратиться для получения информации. Источники данных определяются на основе информации, содержащейся в метабазе – специальном каталоге, включающем описание информации, находящейся в источниках исходных данных.

Определив источники информации, предметный посредник отправляет контекстные запросы индивидуально к каждому источнику исходных данных. Формат запросов стандартизирован и одинаков для всех источников данных. Для конвертации запроса в формат взаимодействия с источником данных используется индивидуальный адаптер.

После извлечения (pull) данные агрегируются и передаются конечным приложениям. На этапе агрегации возможны преобразование и изменение данных, устранение их конфликтов.

С точки зрения конечного приложения взаимодействие осуществляется с единой БД в едином стандартизированном формате.

### Метод интеграции на основе хранилищ данных ETL

Название метода ETL является аббревиатурой от названий функций извлечения (Extract), преобразования (Transform) и загрузки (Load) данных.

Интеграция разнородных источников данных включает предварительное формирование хранилища данных и последующую работу с данными, размещенными не в ИС источников данных, а в хранилище данных [4].

Формирование хранилища данных осуществляется в три этапа.

На первом этапе интегрируемые данные извлекаются из источников данных (source), в качестве которых могут выступать любые организованные хранилища. Метод извлечения зависит от структуры и технической реализации источника. Могут быть использованы прямое подключение (native connection) к БД, запросы к системе (message querying), программный интерфейс (API) и т.д.

Взаимодействие является однонаправленным – при извлечении данных инициатором выступает система синхронизации. Извлечение производится в пакетном режиме – через заданные временные интервалы, которые могут зависеть от множества факторов, включая частоту обновления данных источника и человеческий фактор, и отличаться для каждого отдельного источника.

При первичном извлечении данные берутся из БД источника в полном объеме. При после-

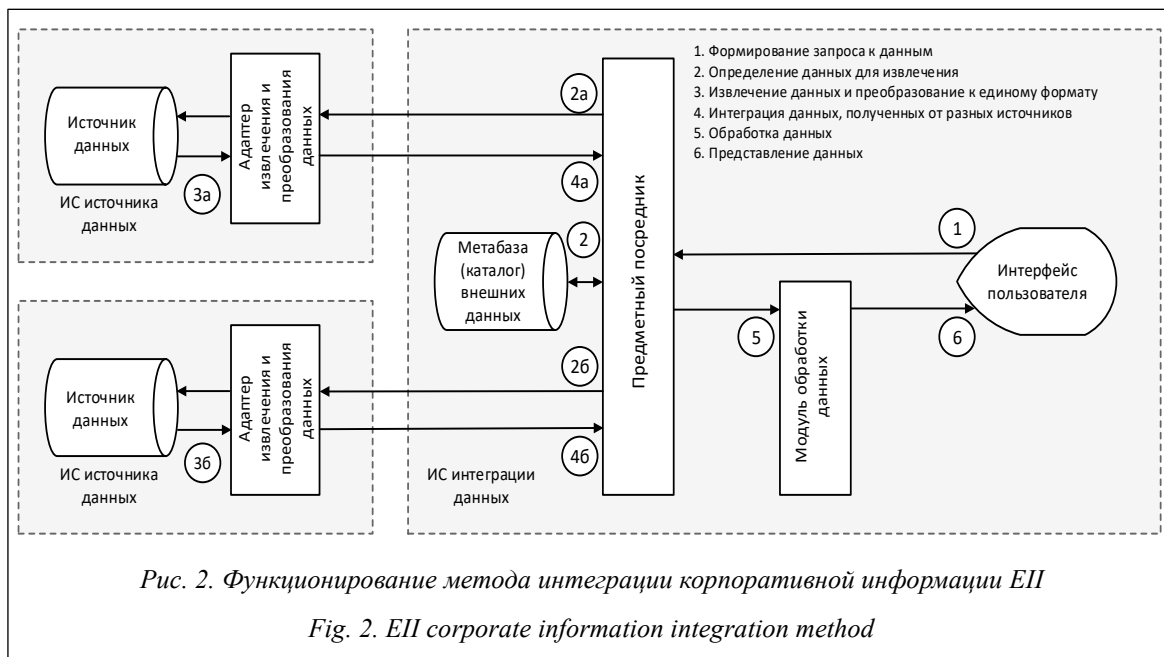


Рис. 2. Функционирование метода интеграции корпоративной информации EII

Fig. 2. EII corporate information integration method



дующих извлечениях для оптимизации работы системы может быть реализован механизм определения изменений данных источника и извлечения только тех, которые необходимы для актуализации информации в промежуточном хранилище (staging area).

В результате выполнения первого этапа интеграции по методу ETL система интеграции локально сохраняет данные, полученные от источника, в промежуточном хранилище и может применить функции преобразования данных.

На втором этапе с помощью функций преобразования осуществляется унификация представления данных промежуточных хранилищ для создания единой структуры хранения и организации данных. Выполняются объединение и слияние или, наоборот, разделение данных, изменение формата представления данных (например, реорганизация таблиц и отношений между таблицами), добавление новых атрибутов, сортировка и фильтрация. Также осуществляются анализ и контроль качества и полноты собранных данных, устраняются конфликты их интеграции.

По завершении данного этапа информация в промежуточных хранилищах приводится в единый формат, определяющий взаимодействие сформированной БД с инструментальными панелями и ПО.

На третьем этапе осуществляется загрузка данных в постоянное хранилище (интегрированных) данных. Хранилище данных (ware-

house) содержит непосредственно данные и метабазу данных.

После выполнения функций загрузки формируется база интегрированных данных, имеющая единую детерминированную структуру и интерфейс, с помощью которого любые модули и приложения могут обращаться к информации, хранящейся в базе.

Функции ETL могут одновременно применяться к нескольким БД источников либо к группам БД источников в случае их однотипности.

Схема интеграции разнородных источников данных на основе хранилища данных представлена на рисунке 3.

Последующая работа с хранилищем данных не отличается от работы с локальной БД, при этом обеспечивается высокая скорость работы с данными [5]. В ИС интеграции на основе хранилища данных реализуются все базовые информационные процессы (рис. 3) обработки информации.

### Интеграция корпоративных приложений EAI

Метод интеграции корпоративных приложений EAI вместо непосредственной интеграции разнородных данных предполагает интеграцию результатов работы двух и более приложений (программ), работающих с независимыми данными.

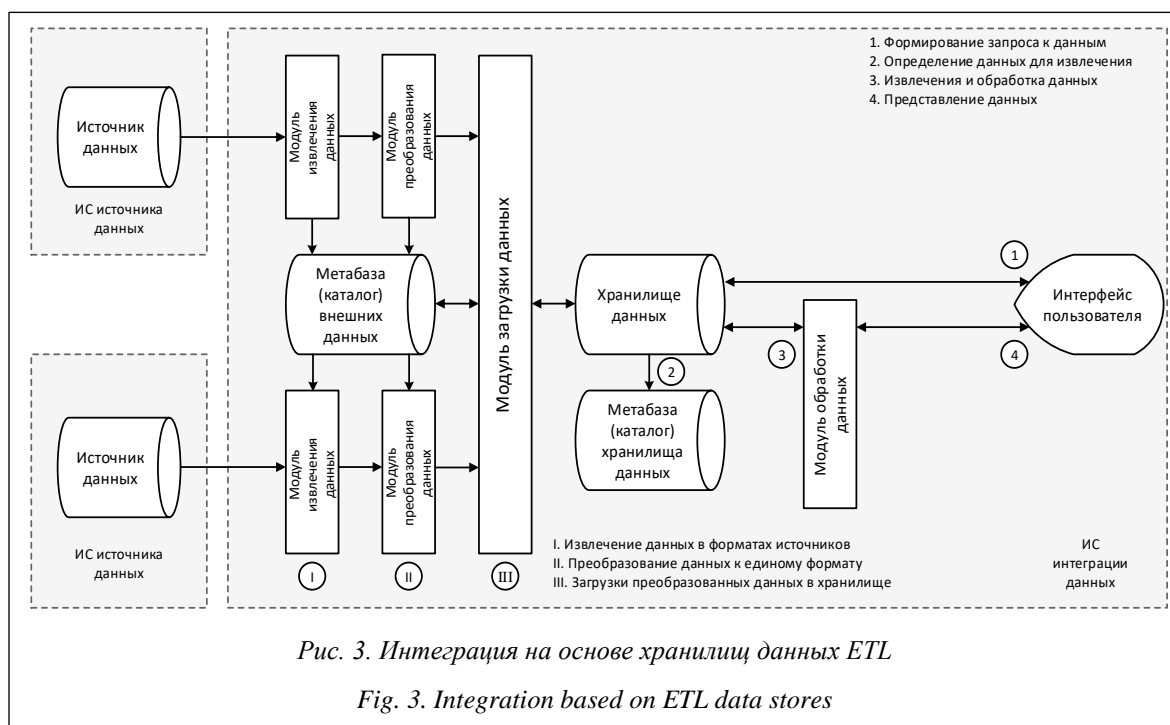


Рис. 3. Интеграция на основе хранилищ данных ETL

Fig. 3. Integration based on ETL data stores

Метод EAI позволяет автоматизировать процессы работы с разнородными данными без необходимости непосредственного обращения к данным и изменения готовых интерфейсов, программ и приложений работы с данными [6].

В контексте данного метода интеграции основной задачей является организация взаимодействия между объединенным интерфейсом работы с приложениями и приложениями-источниками – согласование формата, средств и способов передачи данных от одного приложения к другому.

Существуют несколько наиболее распространенных методов решения данной задачи:

- использование программных адаптеров (adapters) для обоих приложений;
- использование промежуточного ПО, ориентированного на обработку сообщений (Message-oriented middleware, MOM);
- использование репликатора данных (Data Replication Engine, DRE).

Программный адаптер является модификацией приложения, обеспечивающей прием/передачу данных в формате, понятном как приложению-источнику, так и объединенному интерфейсу. Реализация адаптера зависит от конкретного приложения.

Использование промежуточного ПО обеспечивает синхронизацию информации между приложениями с помощью запросов, передаваемых в асинхронном режиме. Формат переда-

ваемых между приложениями сообщений также должен быть согласован.

Использование репликаторов обеспечивает синхронизацию данных на уровне БД. При этом непосредственная интеграция приложений не осуществляется. Репликатор отслеживает изменения в базе-источнике и в случае обнаружения изменений передает их БД, взаимодействующей с объединенным интерфейсом.

Схема интеграции разнородных источников данных на основе метода интеграции корпоративных приложений представлена на рисунке 4.

Иногда при использовании метода интеграции корпоративных приложений EAI дополнительно уточняется, какие именно корпоративные приложения имеются в виду – относящиеся к одной корпорации или к разным. В рамках одной организации интеграция корпоративных приложений обычно описывается термином Business Process Integration (BPI – интеграция бизнес-процессов). Если же речь идет об интеграции ИС разных организаций, то такую интеграцию часто называют B2B-интеграцией (Business-to-Business) [7].

### Обобщенная схема методов интеграции гетерогенных ИС

Появление каждого из описанных выше методов интеграции обусловлено необходимо-

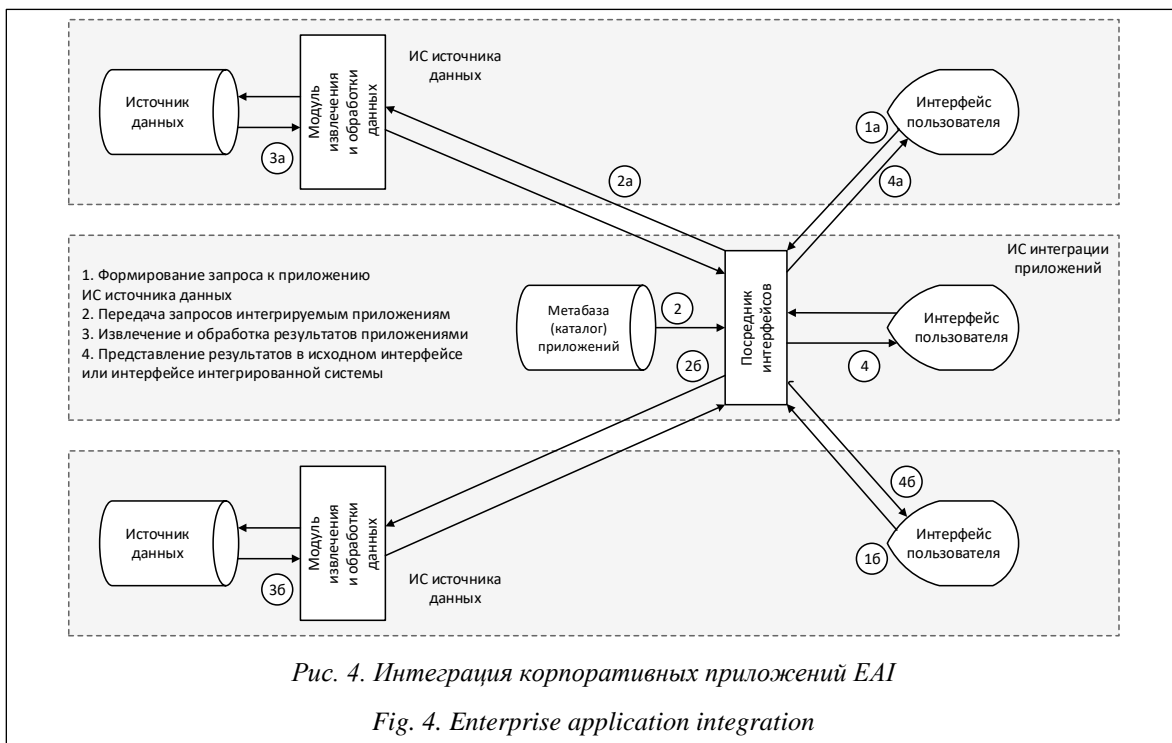


Рис. 4. Интеграция корпоративных приложений EAI

Fig. 4. Enterprise application integration

стью решения определенного круга задач, которые независимо от отрасли или характера деятельности возникали перед компаниями и организациями с ростом объемов используемых данных и расширением ИС.

В ряде случаев возможно использование единственного варианта интеграции данных. Например, отсутствие доступа к исходным данным предопределяет использование метода интеграции приложений EAI, а требование доступности данных независимо от работоспособности ИС источника данных – метода хранилищ данных ETL.

В таблице 1 приведены критерии сравнения методов интеграции гетерогенных ИС для подбора наиболее подходящего варианта реализации интеграции для каждого конкретного случая.

При объединении ИС информационные процессы 1–5 (рис. 1) будут реализованы в различных ИС (множественных ИС источников

данных либо в центральной ИС интеграции) при помощи специализированных программных компонентов (модулей). На основе системного анализа информационных потоков составлена обобщенная схема интеграции гетерогенных ИС (рис. 5) [8]. Пунктиром на схеме показаны условные границы интегрируемых ИС.

ИС источников данных могут работать автономно в локальном режиме (верхняя часть схемы). Интеграция приложений EAI требует применения посредника интерфейсов, управляющего передачей сообщений между интегрируемыми приложениями на основе мета-базы внешних приложений. При этом извлечение и обработка данных выполняются в ИС источников данных, а результаты могут быть представлены как в интерфейсе ИС интеграции, так и в интерфейсах исходных ИС.

Интеграция на основе метода хранилищ данных ETL включает модули извлечения ис-

Таблица 1

**Критерии сравнения методов интеграции гетерогенных ИС**

Table 1

**Criteria for comparing integration methods of heterogeneous IS**

| Критерий                        | Локальные БД                                   | ETL  | EM  | EAI   |
|---------------------------------|--|--|---|---|
| Объект интеграции               | –  | Исходные данные                                      | Исходные данные                               | Приложения, обрабатывающие исходные данные                |
| Объем извлекаемых данных        | Только запрашиваемые пользователем данные      | Все данные   | Только запрашиваемые пользователем данные     | Только запрашиваемые пользователем данные                 |
| Доступ к данным источника       | Требуется частичный в момент запроса к данным  | Требуется в полном объеме в момент извлечения данных | Требуется частичный в момент запроса к данным | Не имеется  |
| Актуальность извлекаемых данных | Всегда актуальны                               | Актуальны на момент последней загрузки               | Всегда актуальны                              | Всегда актуальны  |
| Хранение извлеченных данных     | Долговременное, в собственном хранилище данных | Долговременное, в собственном хранилище данных       | Кратковременное, в оперативной памяти         | Кратковременное, в оперативной памяти                     |
| Формат извлекаемых данных       | Определяется ИС источника данных               | Определяется ИС источника данных                     | Определяется ИС интеграции данных             | Определяется ИС источника данных                          |
| Извлечение данных               | Выполняет ИС источника данных                  | Выполняет ИС интеграции данных                       | Выполняет ИС источника данных                 | Выполняет ИС источника данных                             |
| Преобразование формата данных   | –  | Выполняет ИС интеграции данных                       | Выполняет ИС источника данных                 | Выполняет ИС источника данных                             |
| Обработка данных                | Выполняет ИС источника данных                  | Выполняет ИС интеграции данных                       | Выполняет ИС интеграции данных                | Выполняет ИС источника данных                             |
| Представление данных            | Выполняет ИС источника данных                  | Выполняет ИС интеграции данных                       | Выполняет ИС интеграции данных                | Выполняет ИС источника данных и/или интеграции приложений |

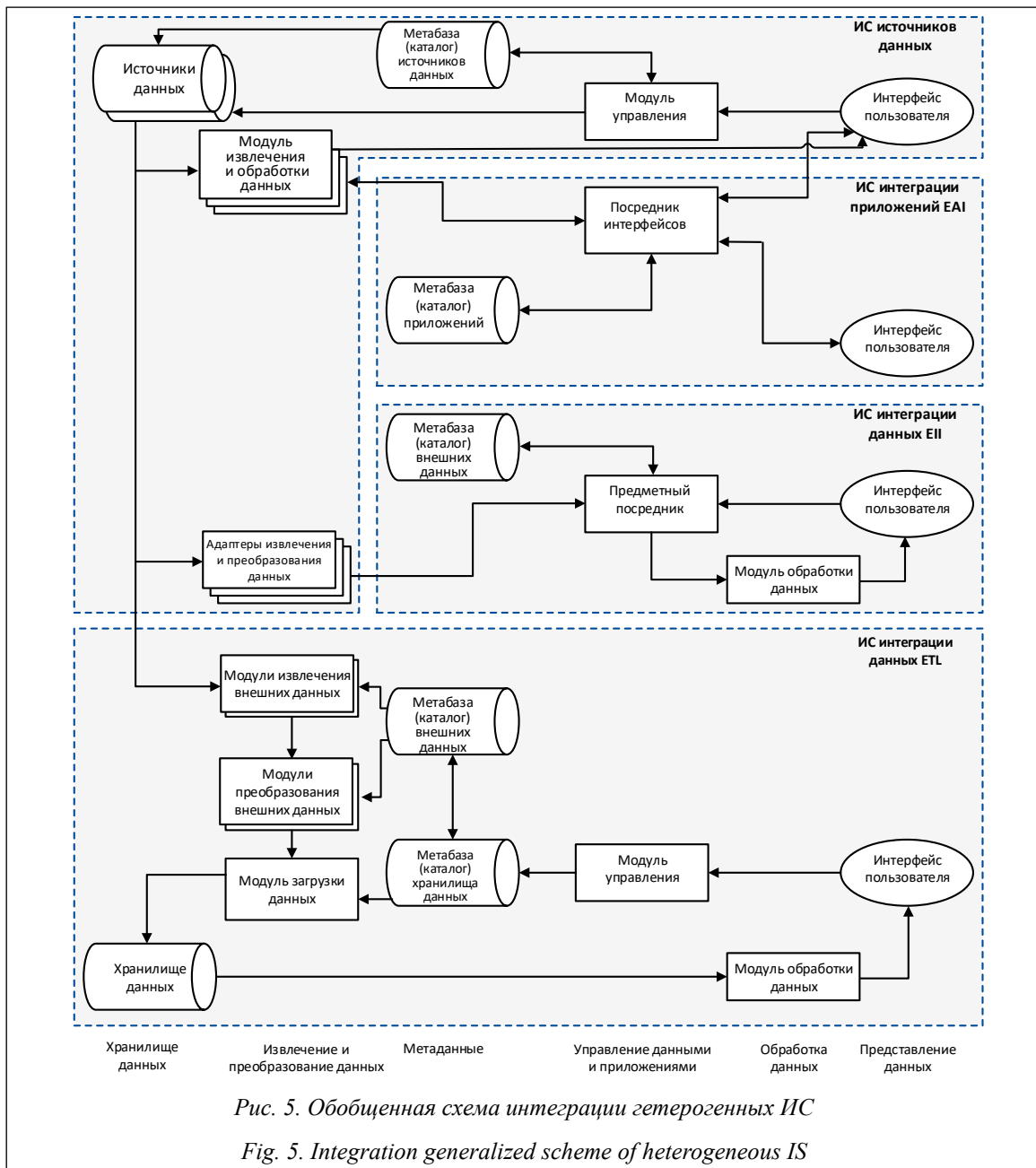


Рис. 5. Обобщенная схема интеграции гетерогенных ИС

Fig. 5. Integration generalized scheme of heterogeneous IS

ходных данных в форматах ИС источников (на основе метабазы внешних данных), преобразования их к формату хранилища данных и загрузки в локальное хранилище (на основе метабазы хранилища данных) [9]. Локальное расположение всех модулей обработки данных требует доступности ИС источников только на момент первичного извлечения данных.

При использовании метода интеграции данных ЕП исключается трудоемкая стадия разработки и заполнения промежуточного хранилища данных, но требуются постоянный доступ к ИС источников данных и размещение в исходных ИС адаптеров извлечения данных и

преобразования к единому формату ИС интеграции.

При интеграции гетерогенных ИС (в отличие от локальной ИС) необходима реализация процессов внешнего информационного обмена. На обобщенной схеме интеграции (рис. 5) эти процессы показаны стрелками информационных потоков, пересекающими условные границы ИС. Также процессы передачи информации имеют место при реализации удаленного доступа пользователей к интерфейсу ИС интеграции.

Принципы интеграции, заложенные в рассмотренных методах, используются для реше-

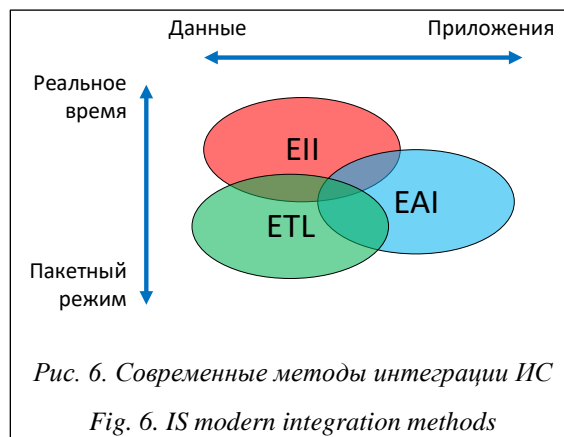
ния широкого круга задач: от интеграции в режиме реального времени до пакетной интеграции и от интеграции данных до интеграции приложений. На рисунке 6 показано положение названных методов по отношению к этим двум типам задач. Для интеграции данных в режиме реального времени более рационален подход ЕП, для пакетной интеграции данных – ETL. Для интеграции приложений в режиме реального времени или пакетном наиболее подходит метод EAI.

**Рекомендации по выбору метода интеграции**

В результате анализа критериев сравнения методов интеграции (табл. 1) и обобщенной схемы интеграции гетерогенных ИС (рис. 5) можно определить ряд ситуаций, в которых использование конкретного метода интеграции является предпочтительным либо единственно возможным. Рекомендации по выбору предпочтительного метода интеграции гетерогенных ИС приведены в таблице 2.

Так, если непосредственный доступ к данным ИС источника отсутствует, то использование методов интеграции данных ЕП и ETL невозможно, а единственным доступным способом является интеграция приложений.

Постоянный доступ к данным может быть обеспечен (не считая локальных БД) только при использовании метода хранилищ данных ETL. Работоспособность интегрированной ИС



на основе методов ЕП и EAI зависит от доступности ИС источников данных.

Требование локального хранения данных может быть обусловлено не только необходимостью обеспечения постоянного доступа к ним, но и целым рядом других причин, например, для организации собственной системы разграничения доступа к данным (по соображениям безопасности, на платной основе и т.д.).

Наличие патентованных (или недоступных по другим причинам) алгоритмов обработки данных ограничивает выбор только методом интеграции приложений EAI, поскольку создание равноценного приложения обработки извлеченных данных (в рамках интегрированной ИС) по вышеуказанным причинам невозможно.

Невозможность полного доступа к данным ИС источника исключает применение метода

Таблица 2

**Рекомендации по выбору предпочтительного метода интеграции гетерогенных ИС**

Table 2

**Recommendations for choosing the preferred method for integrating heterogeneous IS**

| Критерий принятия решения по выбору метода интеграции | Условие интеграции гетерогенных ИС      | Рекомендуемый метод интеграции |
|---|---|--------------------------------|
| Возможность доступа к данным источника                | Доступ к данным отсутствует             | EAI                            |
|   | Доступ к данным возможен                | ETL или ЕП                     |
| Надежность доступа к данным источника                 | Необходим постоянный доступ             | ETL                            |
|   | Постоянный доступ не требуется          | ЕП                             |
| Хранение извлеченных данных                           | Необходимо локальное хранение           | ETL                            |
|   | Не требуется                            | ЕП или EAI                     |
| Высокая скорость доступа к данным                     | Требуется                               | ETL                            |
|   | Не требуется                            | ЕП                             |
| Интеграция расчетных подсистем ИС                     | Требуется                               | EAI                            |
|   | Не требуется                            | ETL или ЕП                     |
| Ограниченность доступа к данным источника             | Доступ на ограниченной (платной) основе | ЕП или EAI                     |
|   | Возможен полный доступ                  | ETL                            |
| Актуальность извлекаемых данных                       | Требуется                               | ЕП или EAI                     |
|   | Не требуется                            | ETL                            |

хранилищ данных. Платный доступ к данным ИС источника определяет высокую стоимость хранилища данных и делает его разработку экономически неэффективной.

Метод хранилищ данных предполагает локальное хранение не только полного объема исходных данных, но и различных промежуточных данных (в процессе их преобразования для загрузки), поэтому ограниченность ресурсов хранения исключает применение этого метода.

Метод хранилищ данных ETL предполагает также определенную периодичность выполнения процедур извлечения внешних данных и загрузки преобразованных данных в локальное хранилище ИС интеграции. Если эти процедуры являются трудоемкими, дорогими, осложнены частой сменой внешних форматов данных и т.д., то это часто может приводить к возможной потере актуальности загруженных в хранилище данных.

### Консолидация ИС в области неорганического материаловедения

Следует отметить, что ни один из существующих на сегодняшний день методов интегра-

ции не способен решить все проблемы, возникающие в области неорганического материаловедения при объединении ИС, разработанных в разных организациях и странах [10], а именно:

- организационную невозможность переноса данных (полного или частичного) за периметр организации (включает невозможность использования ETL) для некоторых ИС;
- обеспечение высокой скорости доступа к консолидированным данным (ограничение на использование ЕП);
- обеспечение доступа пользователей к расчетным подсистемам, функционирующим в рамках некоторых ИС (диктует необходимость консолидации пользовательских интерфейсов (необходимость использования ЕАИ)).

Решить данные проблемы можно путем создания методологии интеграции ИС, сочетающей использование трех обозначенных выше методов интеграции (рис. 7) для обеспечения наиболее тесной консолидации разнородных ИС по свойствам неорганических веществ.

Проиллюстрируем на примерах созданной интегрированной ИС по свойствам неорганических веществ и материалов подходы к решению обозначенных выше проблем.



Рис. 7. Методология интеграции ИС

Fig. 7. The IS integration methodology

### **ЕП для интеграции данных по свойствам неорганических веществ**

Метод создания хранилищ данных хорошо зарекомендовал себя для решения проблем интеграции в рамках одной организации. Поскольку интегрируемые ИС по свойствам неорганических веществ создавались в рамках различных организаций (и даже стран), существовали организационные проблемы, связанные с запретом копирования данных для их перемещения в централизованное хранилище. В то же время разрешался программный (и, как правило, ограниченный) доступ к данным через внешний API. Поэтому для интеграции в этих случаях использовался метод ЕП совместно с подходом Local-as-View, который рассматривает схемы локальных источников данных как материализованные представления в терминах общей глобальной схемы предметной области. Сама глобальная схема описана в терминах иерархии химических понятий «система–вещество–модификация» [10], а программные адаптеры, размещенные поверх интегрируемых источников данных, преобразуют их внутренние информационные структуры к глобальной схеме.

Для осуществления кроссплатформенного взаимодействия используется технология web-сервисов, то есть все программные адаптеры реализуются в качестве web-сервисов, доступных по протоколу SOAP, что позволяет успешно разрешать платформенные конфликты, так как web-сервисы могут быть разработаны на любой современной программной платформе, на которой реализованы интегрируемые источники данных. Учитывая то, что был выбран подход Local-as-View, программные адаптеры предоставляют во внешнюю среду данные в едином формате, оговоренном при описании общей схемы предметной области, и имеют одинаковое, стандартизированное в рамках общей схемы WSDL-описание, что обеспечивает унифицированную работу со всеми подобными web-адаптерами со стороны предметного посредника.

С учетом общей схемы предметной области разработано унифицированное описание web-сервисов программных адаптеров на языке WSDL, которому должны удовлетворять все web-сервисы адаптеров интегрируемых ИС: [http://crystal.imet-db.ru/eii\\_crystal/eii\\_crystal.asmx?WSDL](http://crystal.imet-db.ru/eii_crystal/eii_crystal.asmx?WSDL). В итоге, например, адаптер поверх ИС «Кристалл» ([crystal.imet-db.ru](http://crystal.imet-db.ru)) [http://crystal.imet-db.ru/eii\\_crystal/eii\\_crystal](http://crystal.imet-db.ru/eii_crystal/eii_crystal).

asmx работает по тем же принципам и предоставляет тот же API, что и адаптер для ИС «BandGap» ([bg.imet-db.ru](http://bg.imet-db.ru)) [http://bg.imet-db.ru/eii\\_bandgap/eii\\_bandgap.asmx](http://bg.imet-db.ru/eii_bandgap/eii_bandgap.asmx). В этом смысле система является хорошо масштабируемой и расширяемой – достаточно написать адаптер, удовлетворяющий указанному выше WSDL-описанию, и зарегистрировать его адрес в каталоге ЕП-интеграции, с которым работает предметный посредник. Сам посредник тоже реализован в виде web-сервиса, доступного по адресу <http://meta.imet-db.ru/eii/service.asmx>.

### **ЕТЛ для создания хранилища данных в рамках организации**

В случае необходимости обеспечения быстрого и надежного доступа к интегрированному источнику данных оптимальным является создание хранилища данных, в которое помещается требуемая информация. Создание подобного хранилища, как правило, возможно только в рамках одной организации. В качестве примера приведем хранилище данных, созданное в рамках ИМЕТ РАН для консолидации данных по свойствам химических элементов, содержащихся ранее в БД «Элементы» и БД «Фазы» по основным свойствам неорганических соединений. В итоге по ETL-методу получено единое хранилище, функционирующее под управлением Microsoft SQL Server, используемое информационно-аналитической системой для компьютерного конструирования неорганических соединений. Более того, несколько выходя за рамки классического ETL-метода, были консолидированы и соответствующие web-приложения в рамках единого домена: ИС «Фазы» доступна по адресу <http://phases.imet-db.ru/>, а ИС «Элементы» по адресу <http://phases.imet-db.ru/elements/>.

### **ЕАІ для интеграции пользовательских интерфейсов**

При интеграции web-приложений ИС по свойствам веществ необходим поиск релевантной информации – <http://meta.imet-db.ru/service/service.asmx>.

Интеграция пользовательских интерфейсов интегрируемых ИС по свойствам неорганических веществ позволяет использовать расчетные подсистемы, функционирующие только в контексте исходной ИС. Для обеспечения возможности перехода пользователя в контекст другой ИС для просмотра информации был

разработан web-сервис (<http://meta.imet-db.ru/service/service.asmx>), являющийся средством поиска релевантной информации в контексте интегрированной системы. Поиск осуществляется в метабазе, содержащей сведения о химических веществах, описанных в интегрируемых ИС. Актуальность сведений в метабазе поддерживается за счет использования web-сервиса обновления: <http://meta.imet-db.ru/muservice/muservice.asmx>. Таким образом, пользователь, находясь в контексте одной из ИС, может перейти в другую для просмотра релевантной информации, например, при просмотре сведений по ниобату лития в ИС «Кристалл» предоставляется возможность перехода в ИС «BandGap», «AtomWork», «ТКВ» непосредственно на страницу с  $\text{LiNbO}_3$ .

Очень часто при поиске данных по свойству того или иного вещества неискушенный пользователь не знает, к какой ИС по свойствам неорганических веществ стоит прибегнуть для получения информации. Поэтому была создана специализированная ИС, позволяющая потребителю данных по свойствам неорганических веществ получить возможность просмотра связанной информации по свойствам заданной химической системы в разных ИС: <http://meta.imet-db.ru/>. Данная ИС является web-приложением ASP.Net, написанным на языке C# (клиентская часть: DHTML, CSS, AJAX, jQuery) с использованием ADO.Net, для доступа к метабазе, содержащей консолидированные метаданные. Для построения запросов используются языковые средства Transact-SQL, являющегося диалектом языка SQL.

В настоящее время интеграция на уровне web-приложений проведена для ИС «Bandgap», «Кристалл» (русско- и англоязычные версии), «Диаграмма», «Фазы», «Элементы», «Кремний» (все ИМЕТ РАН), «Термические кон-

станты веществ» (ТКВ, ОИВТ РАН совместно с МГУ) и «AtomWork» (бывшая Pauling File, разработанная в NIMS, Япония).

### Заключение

Полная актуальность данных может быть достигнута только за счет использования методов ЕИ либо ЕАИ. Кроме того, преобразование данных этими методами осуществляется в рамках ИС источников данных. Таким образом, смена форматов исходных данных отражается на интегрированной ИС в минимальной степени.

Использование метода хранилищ данных (ETL) предлагается для создания интегрированного источника данных в рамках одной организации. Это позволит достичь максимальной надежности и скорости работы с интегрированными данными со стороны систем компьютерного конструирования неорганических соединений или других высокоуровневых средств интеграции. Использование метода интеграции данных (ЕИ) предлагается для виртуальной интеграции материаловедческой информации между ИС, как правило, относящимися к разным организациям, запрещающим физическое копирование данных или предоставляющим ограниченный доступ к данным на платной основе. Таким образом, на нижнем уровне (в рамках организации) данные интегрируются с помощью хранилищ данных (ETL), а затем на более высоком уровне интеграция осуществляется с использованием метода ЕИ (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/3.jpg>). Заметим, что возможна реализация многоуровневой схемы использования хранилищ данных и виртуальной интеграции для обеспечения требуемой скорости обработки и масштабируемости.

### Литература

1. Imhoff C. Understanding the Three E's of Integration EAI, ЕИ and ETL. DM Review Magazine, 2005, iss. 4. URL: [http://www.dmreview.com/article\\_sub.cfm?articleId=1023893](http://www.dmreview.com/article_sub.cfm?articleId=1023893) (дата обращения: 25.01.2020).
2. Масюгин В.В., Дударев В.А. Системный анализ технологий интеграции гетерогенных баз данных // Новейшие достижения европейской науки: матер. VII Междунар. науч.-практич. конф. 2011. Т. 34. С. 35–36.
3. Sherman R. Business intelligence guidebook: From data integration to analytics. Morgan Kaufmann Publ., 2014, 550 p.
4. Inmon W.H. Building the data warehouse. John Wiley Publ., 2005, 576 p.
5. Bouaziza S., Nablib A., Gargouric F. Design a data warehouse schema from document-oriented database. Procedia Computer Science, 2019, vol. 159, pp. 221–230.
6. Themistocleous M. Justifying the decisions for EAI implementations: a validated proposition of influential factors. J. Enterprise Information Management, 2004, vol. 17, no. 2, pp. 85–104.



7. Gericke A., Klesse M., Winter R., Wortmann F. Success factors of application integration: an exploratory analysis. *Communications of the Association for Information System*, 2010, vol. 27, no. 1, pp. 677–694. DOI: 10.17705/1CAIS.02737.
8. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ. М., 2012. 679 с.
9. Huang C., Cai H., Xu L., Xu B., Gu Y., Jiang L. Data-driven ontology generation and evolution towards intelligent service in manufacturing systems. *Future Generation Computer Systems*, 2019, vol. 101, pp. 197–207. DOI: 10.1016/j.future.2019.05.075.
10. Дударев В.А. Интеграция информационных систем в области неорганической химии и материаловедения. М.: КРАСАНД, 2016. 320 с.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.283-296

Received 30.01.20  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 283–296

### Integration methods analysis for the development of information-analytical systems on inorganic substances properties

V.A. Dudarev<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vdudarev@hse.ru  
I.O. Temkin<sup>2</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, igortemkin@yandex.ru  
V.F. Korniyushko<sup>3</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, vfk256@mail.ru

<sup>1</sup>National Research University Higher School of Economics, Moscow, 109028, Russian Federation

<sup>2</sup>National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>3</sup>Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the system analysis application to formalize information processes that occur in integrated information systems (IS) and develop a system of recommendations for choosing one of the integration methods for solving practical IS consolidation problems.

The analysis starts with the identification of the basic information processes occurring in local IS and continues with the studying of their transformation in integrated systems built using three consolidation methods: Enterprise Application Integration (EAI), Enterprise Information Integration (EII) and software for extracting, converting, and loading data (Extract, Transform, Load – ETL), based on data warehouse technology.

The authors synthesized a generalized scheme of integration methods for heterogeneous information systems, and based on it, compared the methods using ten criteria. Based on the comparison results, the authors offered recommendations for choosing the preferred method of heterogeneous information systems integration.

There is a possibility to use ETL and EII methods together to achieve the optimal performance of the integrated data source. Since none of the methods covers all the needs arising from the consolidation of information systems, there is a methodology for their joint use for the closest integration of information systems.

Briefly, the paper reviews the practical application results of the developed integration methodology for the IS consolidation in the inorganic materials science field, both domestic and foreign: there is a created web-service set, which is the main technical means that provides interaction of distributed cross-platform information systems on the properties of inorganic substances for data consolidation, and the user interface of a single entry point [www.imet-db.ru](http://www.imet-db.ru), allows any user to search and view information on the properties of substances contained in integrated information systems.

**Keywords:** information processing, data integration, application integration, integration methods comparison, criteria for integration method selection.

### References

1. Imhoff C. *Understanding the Three E's of Integration EAI, EII and ETL*. DM Review Magazine, 2005, iss. 4. Available at: [http://www.dmreview.com/article\\_sub.cfm?articleId=1023893](http://www.dmreview.com/article_sub.cfm?articleId=1023893) (accessed January 25, 2020).
2. Masyutin V.V., Dudarev V.A. System analysis of heterogeneous database integration technologies. *Proc. VII Intern. Sc. Conf.*, Sofia, 2011, vol. 34, pp. 35–36 (in Russ.).
3. Sherman R. *Business Intelligence Guidebook: From Data Integration to Analytics*. Morgan Kaufmann Publ., 2014, 550 p.

4. Inmon W.H. *Building the Data Warehouse. Fourth Edition*. John Wiley Publ., 2005, 576 p.
5. Bouaziza S., Nabil A., Gargouric F. Design a data warehouse schema from document-oriented database. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 159, pp. 221–230.
6. Themistocleous M. Justifying the decisions for EAI implementations: a validated proposition of influential factors. *J. Enterprise Information Management*, 2004, vol. 17, no. 2, pp. 85–104.
7. Gericke A., Klesse M., Winter R., Wortmann F. Success factors of application integration: an exploratory analysis. *Communications of the Association for Information System*, 2010, vol. 27, no. 1, pp. 677–694. DOI: 10.17705/ICAIS.02737.
8. Volkova V.N., Denisov A.A. *Systems Theory and System Analysis*. Moscow, 2012, 679 p. (in Russ.).
9. Huang C., Cai H., Xu L., Xu B., Gu Y., Jiang L. Data-driven ontology generation and evolution towards intelligent service in manufacturing systems. *Future Generation Computer Systems*, 2019, vol. 101, pp. 197–207. DOI: 10.1016/j.future.2019.05.075.
10. Dudarev V.A. *Integration of Information Systems in the Field of Inorganic Chemistry and Materials Science*. Moscow, 2016, 320 p. (in Russ.).

#### Для цитирования

Дударев В.А., Темкин И.О., Корнюшко В.Ф. Анализ методов интеграции для разработки информационно-аналитических систем по свойствам неорганических соединений // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 283–296. DOI: 10.15827/0236-235X.130.283-296.

#### For citation

Dudarev V.A., Temkin I.O., Korniyushko V.F. Integration methods analysis for the development of information-analytical systems on inorganic substances properties. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 283–296 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.283-296.

УДК 004.942  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.297-303

Дата подачи статьи: 14.04.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 297–303

## **Моделирование столкновения двух атомов над поверхностью конденсированной фазы**

А.В. Плетнев <sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор, [pletnev1@yandex.ru](mailto:pletnev1@yandex.ru);

С.А. Желтов <sup>2</sup>, старший преподаватель, [Zheltov.SA@tversu.ru](mailto:Zheltov.SA@tversu.ru)

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

<sup>2</sup> Тверской государственный университет, г. Тверь, 170100, Россия

Испарение вещества с поверхности конденсированной фазы представляет интерес как с практической, так и с теоретической точек зрения. Описать процесс вылета атомов с поверхности конденсированной фазы на микроскопическом уровне можно только с помощью метода молекулярной динамики, метода Монте-Карло или уравнения Больцмана. В связи с этим возникает вопрос о распределении столкновений атомов над поверхностью конденсированной фазы.

Для современной вычислительной техники моделирование испарения даже с микроскопических областей конденсированной фазы за малый промежуток времени – нереальная задача из-за большого объема вычислений. Существенную проблему представляет описание взаимодействия двух молекул в газовой фазе.

В статье анализируется проблема столкновения двух атомов над поверхностью конденсированной фазы после вылета с ее ограниченной области. В компьютерных экспериментах использовалась модель жестких сфер.

Моделирование методом Монте-Карло подразумевает статистическую обработку результатов достаточно большого числа экспериментов. Использование последовательных вычислений на стандартных CPU неэффективно с точки зрения времени выполнения программ. Последовательный алгоритм, реализующий моделирование столкновений 1 млн атомов, требует порядка 10 часов машинного времени. Для большей достоверности результатов желательно, чтобы в каждом эксперименте сталкивались как минимум 300 млн атомов. Алгоритм расчета обладает параллелизмом по данным и может быть адаптирован для параллельных вычислений на графических процессорах с архитектурой CUDA, что позволяет существенно снизить фактическое время выполнения программ и повысить достоверность результатов за счет увеличения количества разыгрываемых пар атомов.

**Ключевые слова:** параллельные вычисления, метод Монте-Карло, атом, столкновение, моделирование.

Оптимизация тепломассопереноса в технологических процессах связана с взаимодействием потока вещества со стенками систем [1–3]. Особый интерес представляет исследование процесса тепломассопереноса в наноразмерных системах [4–6], когда число Кнудсена больше единицы. На микроскопическом уровне испарение вещества с поверхности конденсированной фазы связано с взаимодействием вылетающих молекул с молекулами конденсированной фазы и с другими молекулами, вылетевшими с поверхности конденсированной фазы [7–9]. Возможен аналог образования слоя Кнудсена при испарении вещества [10–12]. В этом слое практически нет столкновений вылетающих с поверхности конденсированной фазы атомов друг с другом [13–15]. При слабоинтенсивном испарении вещества с поверхности конденсированной фазы атомы или молекулы могут пролететь достаточно большое расстояние до взаимного столкновения [16–18].

В данной работе на основе компьютерного эксперимента методом Монте-Карло проведен анализ распределений столкновений двух атомов над поверхностью, вылетевших с ограниченного участка поверхности конденсированной фазы. Метод Монте-Карло достаточно часто используется при численном моделировании различных физических систем. При этом достоверность результатов во многом обусловлена количеством сгенерированных и обработанных вариантов, что делает нецелесообразным использование последовательных вычислений на CPU из-за высоких затрат времени на проведение эксперимента.

Одним из способов повышения производительности является использование параллельных вычислений. Новый подход к рассматриваемой физической задаче и соответствующая модель процесса испарения потребовали разработки нового параллельного алгоритма и ПО. Одним из наиболее доступных вариантов орга-

низации параллельных вычислений является использование GPU с архитектурой CUDA. Важным фактором при выборе вычислительной платформы послужило распараллеливание задачи по данным, что полностью соответствует специфике организации вычислений на графических процессорах. Это позволило создать программу, эффективно решающую задачу моделирования процесса испарения и получения распределений столкновений двух атомов, и получить достоверные статистические данные.

**Параллельный алгоритм моделирования столкновений двух атомов**

В процессе испарения с поверхности вылетает большое количество атомов с различными скоростями, часть которых сталкиваются друг с другом. Закон движения для каждого атома зависит только от начальных данных (координат на поверхности и скорости). Очевидно, что можно производить вычисления для нескольких пар атомов одновременно, то есть инструкции будут одинаковыми, а данные разными. Другими словами, задача относится к классу SIMD (Single Instruction stream/Multiple Data stream) и алгоритм может быть адаптирован к эффективным вычислениям на графических процессорах с технологией CUDA (Compute Unified Device Architecture) [19].

Блок-схема параллельного алгоритма моделирования столкновений атомов, вылетевших с поверхности конденсированной фазы, представлена на рисунке 1.

Программная реализация выполнена на языке C++ с использованием набора расширений для графических процессоров Nvidia с архитектурой CUDA. Для генерации значений случайных величин использовались библиотека CURAND и генераторы чисел, распределенных по нормальному и равномерному законам. Приведем пример заполнения массива случайными числами в параллельном режиме:

```
#include <cuda.h>
#include <curand.h>
...
cudaMalloc((void*)& devX1, CHH *
sizeof(double));
cudaMalloc((void*)& devVX1, CHH *
sizeof(double));
curandGenerator_t gen;
curandCreateGenerator(&gen,
CURAND_RNG_PSEUDO_DEFAULT);
curandSetPseudoRandomGeneratorSeed(gen,
1234ULL);
```

```
curandGenerateUniformDouble(gen, devX1,
CHH);
curandGenerateNormalDouble(gen, devVX1,
CHH, m, sigma);
...
cudaMemcpy(ptrX1, devX1, CHH * sizeof(double), cudaMemcpyDeviceToHost);
cudaMemcpy(ptrVX1, devVX1, CHH *
sizeof(double), cudaMemcpyDeviceToHost);
```

Каждый компьютерный эксперимент проводился до тех пор, пока не разыгрывалось более 300 млн столкновений пар атомов. Так, 1 200 692 724 столкновений произошло за 19.34 сек., 2101667707 – за 34.4 сек., 6303823665 – за 100.47 сек. Точность полученных результатов меньше нескольких сотых процента. Для каждой пары атомов разыгрывались их положения  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  на ограни-

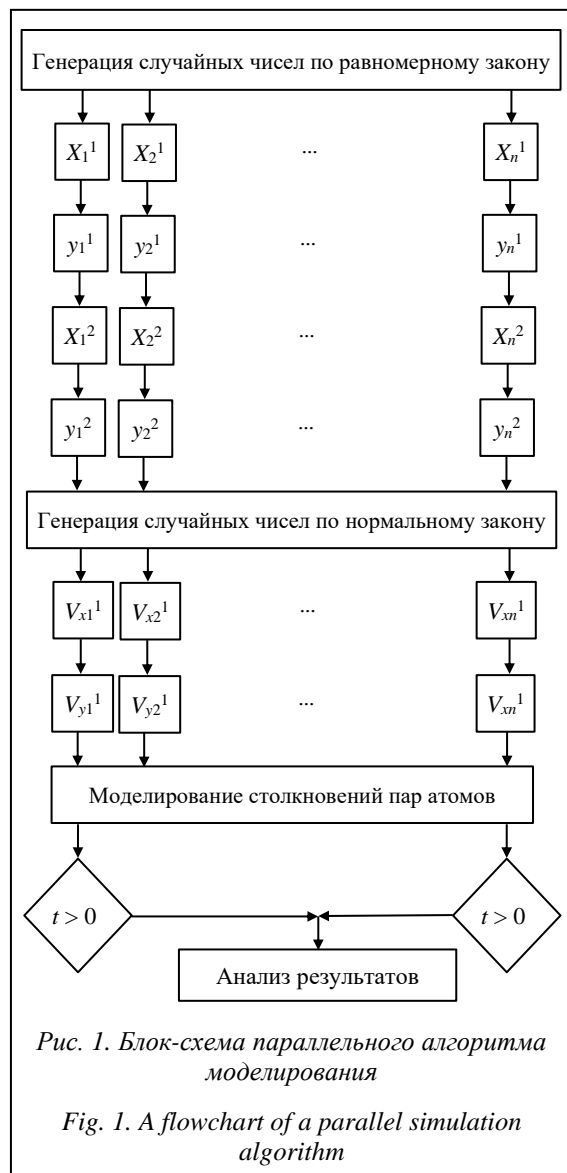
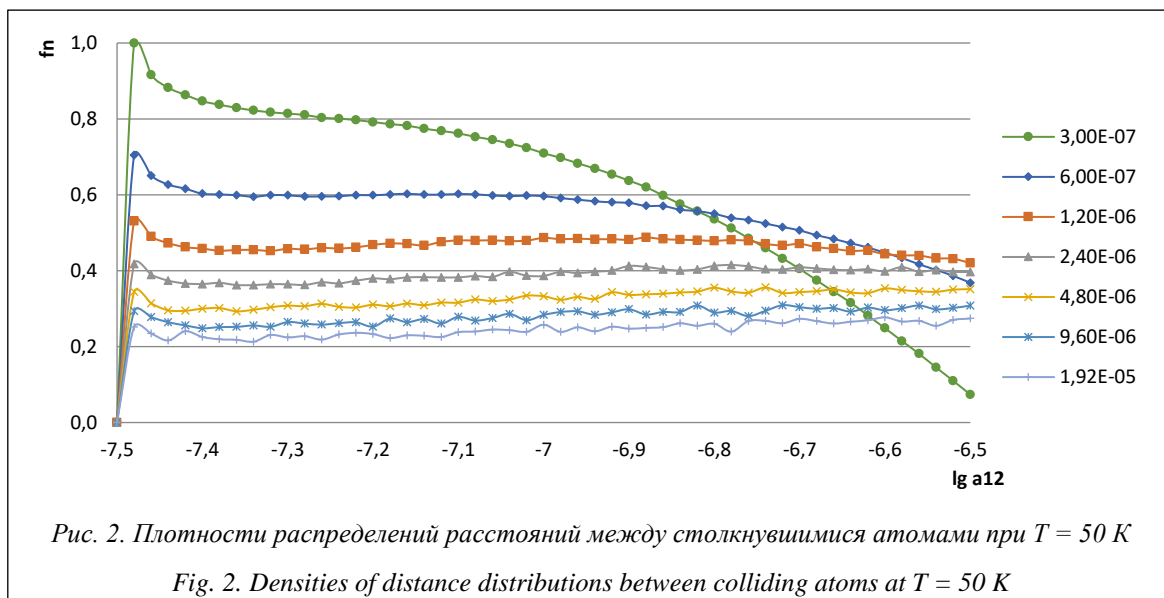


Рис. 1. Блок-схема параллельного алгоритма моделирования

Fig. 1. A flowchart of a parallel simulation algorithm



ченном участке поверхности конденсированной фазы со стороны  $a = 3 \cdot 10^{-9}\text{ м}$  (в базовом варианте) и компоненты скоростей этих атомов ( $v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}$ ) и ( $v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}$ ) в плоскости  $z = 0$ . В модели жестких сфер предполагалось, что атомы имеют вид сфер с радиусом  $r = 1,5 \cdot 10^{-10}\text{ м}$  и массой  $m = 40\text{ а.е.м.}$

Вычисления производились на гетерогенной платформе HybriLIT, состоящей из суперкомпьютера «Говорун» и учебно-тестового полигона HybriLIT. Данная платформа является частью многофункционального информационно-вычислительного комплекса лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна [20]. Для моделирования процесса столкновений атомов, вылетевших с поверхности конденсированной фазы, использовался ускоритель NVIDIA Tesla K80 (4 992 ядра CUDA на карте с двумя GPU, производительность в операциях с двойной точностью до 2,91 терафлопса) [21].

Как видно из результатов эксперимента, при значительном увеличении количества столкновений (соответственно, и разыгранных пар атомов, вылетевших с поверхности конденсированной фазы) фактическое время выполнения растет линейно. Адаптация алгоритма к параллельным вычислениям позволила смоделировать процесс вылета для увеличенных размеров области испарения и выявить зависимости от размера этой площади.

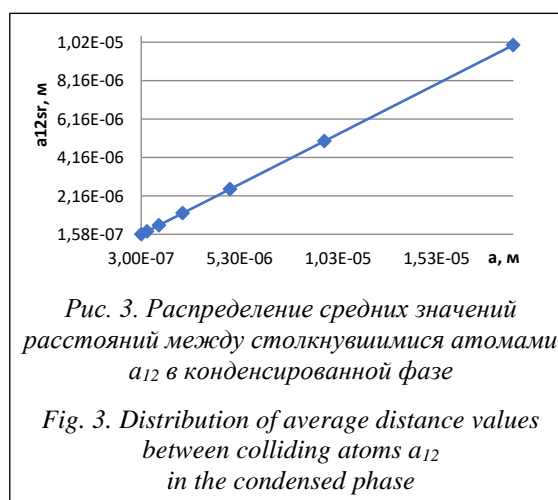
### Результаты расчетов

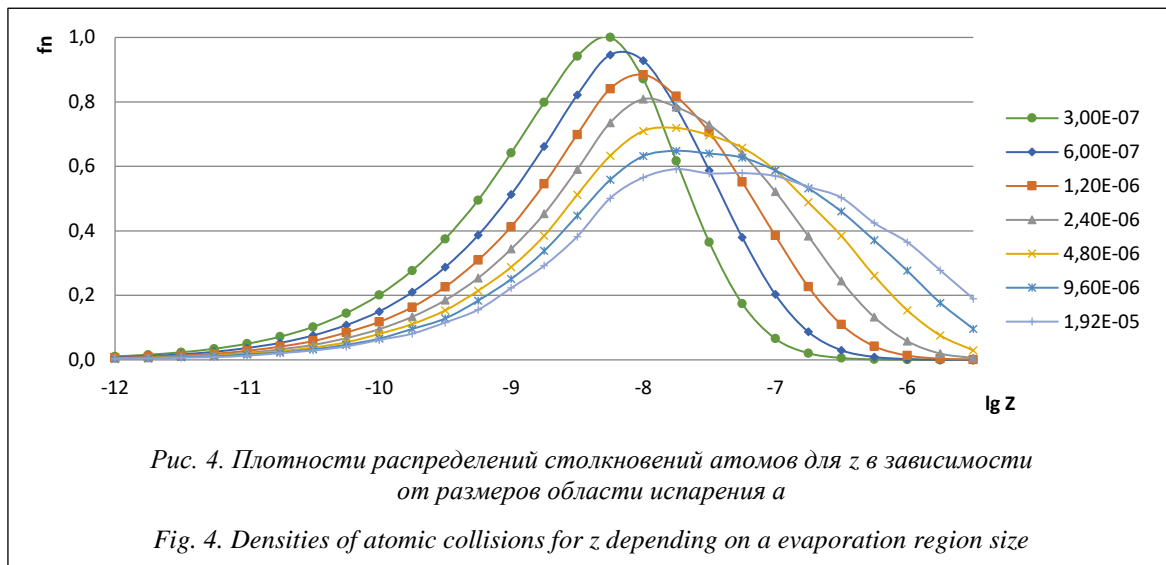
В данной работе представлены результаты расчетов распределения столкновений двух

атомов, вылетевших с ограниченной поверхности конденсированной фазы, в зависимости от размера области испарения  $a$  и температуры поверхности конденсированной фазы  $T$ .

На рисунке 2 представлены результаты расчетов нормированных плотностей распределений расстояний между атомами на поверхности конденсированной фазы  $a_{12}$ , столкнувшимися над поверхностью. Минимальное расстояние равно диаметру атомов, а максимальное – положению атомов в противоположных углах области испарения.

Распределение средних расстояний между столкнувшимися атомами в зависимости от размера области испарения показано на рисунке 3. Установлено, что средние расстояния увеличиваются линейно с увеличением размера области испарения. Необходимо отметить: как плотности распределений, так и средние значения расстояний  $a_{12}$  не зависят от тем-





пературы конденсированной фазы  $T$ . Это можно объяснить тем, что положения атомов на поверхности конденсированной фазы разгравались с помощью датчика равномерно распределенных случайных величин. С физической точки зрения это означает, что интенсивность испарения уменьшается.

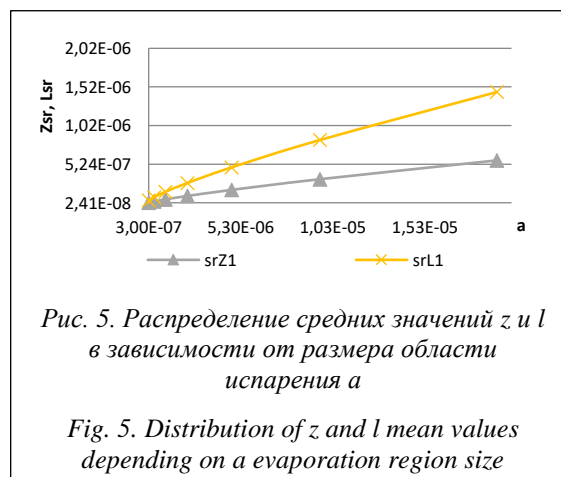
Проведенные компьютерные эксперименты показали, что плотности распределений столкновений над поверхностью конденсированной фазы ( $z = 0$ ) не зависят от температуры конденсированной фазы  $T$ . Величина  $z$  определялась как расстояние от поверхности конденсированной фазы до точки столкновения атомов. Это можно объяснить тем, что температура поверхности определяет средние скорости атомов, влияющие на время до столкновения атомов, но не на геометрию расстояния до столкновения.

Аналогичный вид имеет и плотность распределения длин пробега атомов до столкновения  $l$ . Данная величина определялась как квадратный корень из суммы квадратов проекций перемещений первого атома на оси координат.

Плотности распределений столкновений над поверхностью конденсированной фазы  $z$  в зависимости от стороны области испарения  $a$  отражены на рисунке 4. С увеличением размера области испарения плотности распределений и максимумы распределений смещаются в область больших значений  $z$ . Плотности распределений становятся более пологими, а максимумы распределений уменьшаются по величине. Это можно объяснить тем, что расстояния между сталкивающимися атомами на поверхности конденсированной фазы с увеличением области испарения растут.

Следует отметить, что кривые плотностей распределений для величины  $l$  на графике (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/20.jpg>) выглядят так же, как и для плотности распределения величины  $z$ . С увеличением размера области испарения  $a$  увеличиваются не только расстояния до столкновения атомов над поверхностью, но и проекции пробегов атомов по осям  $Ox$  и  $Oy$ . Вследствие этого соответствующие максимумы для величины  $l$  сдвинуты вправо по отношению к максимумам величины  $z$ .

Представляет интерес получение распределений средних значений  $z$  и  $l$  в зависимости от размеров области испарения  $a$ . Установлено, что от температуры поверхности средние значения  $z$  не зависят, так как они связаны с плотностями распределений  $z$ , которые также не зависят от температуры. Зависимость средних значений  $z$  и  $l$  от размеров области испарения  $a$  показана на рисунке 5. Получены линейные зависимости от размеров области испарения  $a$ .



Необходимо отметить, что с увеличением области испарения более чем в 60 раз максимумы распределений, а соответственно, и средние значения, увеличиваются только на порядок.

### Заключение

Полученные в компьютерных экспериментах результаты расчетов позволили установить закономерности распределений столкновений

двух вылетевших атомов над поверхностью конденсированной фазы. Установлено, что плотности распределений имеют сложную структуру, которая только через средние значения может быть связана с определением слоя Кнудсена. Получить данные результаты удалось благодаря использованию параллельных вычислений на графических процессорах nVidia и адаптации алгоритма расчета столкновений атомов к архитектуре CUDA.

### Литература

1. Lee J., Laoui T., Karnik R. Nanofluidic transport governed by the liquid/vapour interface. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, vol. 9, pp. 317–323. DOI: 10.1038/nnano.2014.28.
2. Li Y., Alibakhshi M.A., Zhao Y., Duan C. Exploring ultimate water capillary evaporation in nanoscale conduits. *Nano Lett.*, 2017, vol. 17, pp. 4813–4819.
3. Wilke K.L., Barabadi B., Lu Z., Zhang T., Wang E.N. Parametric study of thin film evaporation from nanoporous membranes. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, iss. 17, art. 171603. DOI: 10.1063/1.4997945.
4. Xiao R., Maroo S.C., Wang E.N. Negative pressures in nanoporous membranes for thin film evaporation. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, iss. 12, art. 123103. DOI: 10.1063/1.4798243.
5. Lu Z., Narayanan S., Wang E.N. Modeling of evaporation from nanopores with nonequilibrium and nonlocal effects. *Langmuir*, 2015, vol. 31, pp. 9817–9824.
6. Frezzotti A. Boundary conditions at the vapor-liquid interface. *Phys. Fluids*, 2011, vol. 23, iss. 3, art. 030609. DOI: 10.1063/1.3567001.
7. Persad A.H., Ward C.A. Expressions for the evaporation and condensation coefficients in the Hertz-Knudsen relation. *Chem. Rev.*, 2016, vol. 116, pp. 7727–7767.
8. Knudsen M. Die maximale verdampfungsgeschwindigkeit des quecksilbers. *Ann. Phys.*, 1915, vol. 352, pp. 697–708.
9. Tcheremissine F.G. Solution to the Boltzmann kinetic equation for high-speed flows. *Comput. Math. Phys.*, 2006, vol. 46, pp. 315–329.
10. Ishiyama T., Fujikawa S., Kurz T., Lauterborn W. Nonequilibrium kinetic boundary condition at the vapor-liquid interface of argon. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 88, iss. 4, art. 042406. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.042406.
11. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Liquid temperature dependence of kinetic boundary condition at vapor-liquid interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 99, pp. 317–326.
12. Cheng S., Lechman J.B., Plimpton S.J., Grest G.S. Evaporation of Lennard-Jones fluids. *J. Chem. Phys.*, 2011, vol. 134, iss. 22, art. 224704. DOI: 10.1063/1.3595260.
13. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Method of determining kinetic boundary conditions in net evaporation/condensation. *Phys Fluids*, 2014, vol. 26, iss. 7, art. 072003. DOI: 10.1063/1.4890523.
14. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Kinetic boundary condition in vapor-liquid two-phase system during unsteady net evaporation/condensation. *Eur. J. Mech.-B/Fluids*, 2017, vol. 64, pp. 81–92. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.12.001.
15. Kobayashi K., Sasaki K., Kon M., Fujii H., Watanabe M. Kinetic boundary conditions for vapor-gas binary mixture. *Microfluid Nanofluid*, 2017, vol. 21. DOI: 10.1007/s10404-017-1887-6.
16. Уварова Л.А., Плетнев Л.В. Компьютерное моделирование столкновений частиц при вылете с поверхности конденсированной фазы // *Тр. ИСА РАН. Динамика неоднородных систем*. 2008. Т. 32. С. 131–139.
17. Уварова Л.А., Плетнев Л.В. Распределения столкновений частиц при вылете с поверхности конденсированной фазы // *Вестн. Поморского ун-та: Естественные науки*. 2009. Т. 3. С. 102–107.
18. Плетнев Л.В. Распределения бинарных столкновений атомов при вылете с поверхности конденсированной фазы // *Вестн. ТГТУ*. 2011. Т. 17. Вып. 2. С. 520–524.
19. Желтов С.А. Особенности адаптации вычислительных алгоритмов к архитектуре CUDA // *Математические методы управления: сб. науч. тр. ТГТУ*. 2011. С. 33–36.
20. Гетерогенная платформа HybriLIT. URL: <http://hlit.jinr.ru> (дата обращения: 02.03.2020).
21. NVIDIA Tesla K80. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/data-center/tesla-k80> (дата обращения: 01.04.2020).

## Simulation of a collision of two atoms over a condensed phase surface

L.V. Pletnev<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, pletnevl@yandex.ru  
S.A. Zheltov<sup>2</sup>, Senior Lecturer, Zheltov.SA@tversu.net

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, 170100, Russian Federation

<sup>2</sup> Tver State University, Tver, 170026, Russian Federation

**Abstract.** Evaporation of a substance from a condensed phase surface is of interest from both practical and theoretical points of view. It is possible to describe the process of departure of atoms from the condensed phase surface at the microscopic level only using the molecular dynamics method, the Monte Carlo method, or the Boltzmann equation. This raises the problem distributing collisions of atoms over the condensed phase surface.

Simulation of evaporation even from microscopic areas of the condensed phase in a short period of time is an unrealistic task for modern computer technology due to many calculations. The description of the interaction of two molecules in the gas phase is a significant problem.

The article analyzes the problem of collision of two atoms over the condensed phase surface after departure from its bounded areas. Computer experiments involved using a model of rigid spheres.

Monte Carlo simulation involves statistical processing of the results of a large number of experiments. Using sequential calculations on standard CPUs is inefficient in terms of program execution time. A sequential algorithm that implements simulation of collisions of 1 000 000 atoms requires about 10 hours of machine time. For greater reliability of the results, it is desirable that a minimum of 300 000 000 atoms collide in each experiment. The calculation algorithm has data parallelism and can be adapted for parallel calculations on graphics processors with the CUDA architecture, which makes it possible to significantly reduce the actual program execution time and increase the reliability of results by increasing the number of played pairs of atoms.

**Keywords:** parallel computing, Monte Carlo method, atom, collision, simulation.

### References

1. Lee J., Laoui T., Karnik R. Nanofluidic transport governed by the liquid/vapour interface. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, vol. 9, pp. 317–323. DOI: 10.1038/nnano.2014.28.
2. Li Y., Alibakhshi M.A., Zhao Y., Duan C. Exploring ultimate water capillary evaporation in nanoscale conduits. *Nano Lett.*, 2017, vol. 8, no. 17, pp. 4813–4819.
3. Wilke K.L., Barabadi B., Lu Z., Zhang T., Wang E.N. Parametric study of thin film evaporation from nanoporous membranes. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, iss. 17, art. 171603. DOI: 10.1063/1.4997945.
4. Xiao R., Maroo S.C., Wang E.N. Negative pressures in nanoporous membranes for thin film evaporation. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, iss. 12, art. 123103. DOI: 10.1063/1.4798243.
5. Lu Z., Narayanan S., Wang E.N. Modeling of evaporation from nanopores with nonequilibrium and nonlocal effects. *Langmuir*, 2015, vol. 31, pp. 9817–9824.
6. Frezzotti A. Boundary conditions at the vapor-liquid interface. *Phys. Fluids*, 2011, vol. 23, iss. 3, art. 030609. DOI: 10.1063/1.3567001.
7. Persad A.H., Ward C.A. Expressions for the evaporation and condensation coefficients in the Hertz-Knudsen relation. *Chem. Rev.*, 2016, vol. 116, pp. 7727–7767.
8. Knudsen M. Die maximale verdampfungsgeschwindigkeit des quecksilbers. *Ann. Phys.*, 1915, vol. 352, pp. 697–708.
9. Tcheremissine F.G. Solution to the Boltzmann kinetic equation for high-speed flows. *Comput. Math. Phys.*, 2006, vol. 46, pp. 315–329.
10. Ishiyama T., Fujikawa S., Kurz T., Lauterborn W. Nonequilibrium kinetic boundary condition at the vapor-liquid interface of argon. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 88, iss. 4, art. 042406. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.042406.
11. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Liquid temperature dependence of kinetic boundary condition at vapor-liquid interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 99, pp. 317–326.
12. Cheng S., Lechman J.B., Plimpton S.J., Grest G.S. Evaporation of Lennard-Jones fluids. *J. Chem. Phys.*, 2011, vol. 134, iss. 22, art. 224704. DOI: 10.1063/1.3595260.
13. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Method of determining kinetic boundary conditions in net evaporation/condensation. *Phys Fluids*, 2014, vol. 26, iss. 7, art. 072003. DOI: 10.1063/1.4890523.



14. Kon M., Kobayashi K., Watanabe M. Kinetic boundary condition in vapor-liquid two-phase system during unsteady net evaporation/condensation. *Eur. J. Mech.-B/Fluids*, 2017, vol. 64, pp. 81–92. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.12.001.
15. Kobayashi K., Sasaki K., Kon M., Fujii H., Watanabe M. Kinetic boundary conditions for vapor-gas binary mixture. *Microfluid Nanofluid*, 2017, vol. 21. DOI: 10.1007/s10404-017-1887-6.
16. Uvarova L.A., Pletnev L.V. Computer simulation of particle collisions during departure from the surface of the condensed phase. *Proc. ISA RAS. Dynamics of Inhomogeneous Systems*, 2008, vol. 32, pp. 131–139.
17. Uvarova L.A., Pletnev L.V. Distributions of particle collisions at departure from the surface of the condensed phase. *Bull. Pomeranian Univ. Ser. Natural Sciences*, 2009, vol. 3, pp. 102–107.
18. Pletnev L.V. Distributions of binary collisions of atoms at departure from the surface of the condensed phase. *Bull. TSTU*, 2011, vol. 17, iss. 2, pp. 520–524.
19. Zheltov S.A. Features of adaptation of computational algorithms to the CUDA architecture. *Proc. TSTU. Mathematical Methods of Management*, 2011, pp. 33–36.
20. *Heterogeneous HybriLIT Platform*. Available at: <http://hlit.jinr.ru> (accessed March 02, 2020).
21. *NVIDIA Tesla K80*. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/data-center/tesla-k80> (accessed April 01, 2020).

#### Для цитирования

Плетнев Л.В., Желтов С.А. Моделирование столкновения двух атомов над поверхностью конденсированной фазы // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 297–303. DOI: 10.15827/0236-235X.130.297-303.

#### For citation

Pletnev L.V., Zheltov S.A. Simulation of a collision of two atoms over a condensed phase surface. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 297–303 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.297-303.

УДК 621.311:658.26  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309

Дата подачи статьи: 21.02.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 304–309

## **Подходы к созданию онтологий для автоматизированных систем в машиностроительных производствах**

Г.Б. Бурдо<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Технология и автоматизация машиностроения», [gbtms@yandex.ru](mailto:gbtms@yandex.ru)

Н.А. Семенов<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы»

Н.В. Воронцов<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия

Большинство отечественных машиностроительных предприятий, выпускающих наукоемкую продукцию, характеризуются многономенклатурностью изделий и частой сменой видов изделий, что обуславливает необходимость сокращения времени, предусмотренного на выполнение этапов жизненного цикла изделия. Это возможно путем использования автоматизированных систем проектирования и изготовления.

Известно, что достаточно перспективным является онтологический подход к созданию автоматизированных систем, однако его использование может затрудняться применением не совсем рациональных методов.

В статье рассмотрены системные принципы и дано математическое описание предметной системы онтологий. Показано, что функция онтологий – это определяющий систему онтологий признак, вытекающий из целей разработки онтологий. Предлагается, помимо функции, определять систему онтологий набором элементов, связями между элементами данной системы онтологий с другими системами онтологий, параметрами каждого элемента в онтологии, параметром времени, онтологиями области решений, области исходных данных, области задач.

На основе методологии жизненного цикла изделия показано, что выявленные двенадцать стадий жизненного цикла характеризуются тем, что в рамках каждой из них решается одна задача, свойственная машиностроительному производству. Это значит, что для осуществления процесса проектирования в автоматизированной системе для данной стадии строится и реализуется одна система онтологий, а в рамках одного этапа реализуются несколько систем онтологий, связанных между собой, как имеющие значительные области пересечения. В каждом конкретном случае состав этапов жизненного цикла изделия нуждается в уточнении. Предлагается уточнение этапов, как и выявление задач, решаемых на этапах жизненного цикла изделия, выполнять на основе изучения процессов деятельности организации.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы проектирования и управления, машиностроение, онтология, жизненный цикл изделия, управление процессами, системный подход.

Большинство отечественных машиностроительных предприятий, выпускающих наукоемкую продукцию, характеризуются многономенклатурностью изделий и частой сменой их видов, при этом необходимо сокращать период времени, предусмотренный на выполнение этапов жизненного цикла изделия (ЖЦИ).

Сегодня в различных автоматизированных системах проектирования, управления процессами предприятия, управления производственными системами и т.п., позволяющих значительно сократить длительность подготовки производства и повысить ее качество, активно реализуются элементы искусственного интеллекта.

Известно, что онтологический подход к созданию автоматизированных систем является

достаточно перспективным направлением, однако его применение может затрудняться использованием не совсем рациональных методов. Поэтому цель авторов – выявление концептуальных подходов к созданию автоматизированных систем, построенных на онтологическом подходе.

### **Подходы к построению автоматизированных систем проектирования и управления на основе онтологий**

В работах [1–4] было показано, что онтологический подход открывает новые возможности для построения машиностроительных автоматизированных систем. Однако методологи-

ческая сторона вопроса не была досконально изучена, что привело к рассмотрению онтологий как к подходу вообще. В литературе, касающейся машиностроения, онтологии представлены как некий набор элементов производственных систем, соединенных связями и описываемых рядом параметров. В этом случае возникает естественный вопрос о целях создания онтологий. Если как некая база знаний ознакомительного характера в познавательных целях, то такой подход, наверное, может иметь место. Если же говорить об онтологиях как об аппарате для создания автоматизированных систем, то, на взгляд авторов, следует учитывать принципы построения онтологий.

### Принципы построения онтологий

**Системные принципы создания онтологий.** Как уже отмечалось, онтологии – не самоцель, а эффективный инструментарий. Систему онтологий ( $O$ ) можно характеризовать следующим набором признаков:  $O = \langle F, N, S, P, t \rangle$ , а  $O = \{O_1, O_2, O_3\}$ , где  $F$  – функция онтологий;  $N$  – набор элементов в онтологии;  $S$  – связи между элементами данной системы онтологий с другими системами онтологий (для решения других задач);  $P$  – параметры каждого элемента в онтологии;  $t$  – параметр времени в онтологиях;  $O_1$  – онтологии области решений;  $O_2$  – онтологии области исходных данных;  $O_3$  – онтологии области задач.

Функция  $F$  онтологий – это определяющий систему онтологий признак, вытекающий из целей разработки онтологий. В общем случае функция онтологий  $O$  – установление посредством  $O_2$  связей между  $O_3$  и  $O_1$ .

К примеру, если онтологии разрабатываются в целях создания автоматизированной системы проектирования технологических процессов механической обработки, то конечная функция онтологий – установление связей между структурой детали, параметрами качества ее поверхностей, параметрами технологической системы (оборудование, инструмент, технологическая оснастка), параметрами производственной системы (организационные формы реализации технологических процессов, целевая функция технологического процесса), с одной стороны, и параметрами и структурой технологического процесса – с другой [5–7].

Если рассматривать вопросы управления технологическими процессами механической обработки, то среди параметров детали нас бу-

дут интересовать, в первую очередь, трудоемкость и станкоемкость ее изготовления, масса.

Набор элементов  $N$  в онтологии  $O = \{O_1, O_2, O_3\}$  определяется из соображений полного и адекватного описания областей решений, исходных данных и задач.

Связи  $S$  между элементами определяют информационные преобразования, посредством которых синтезируется проектное решение, иерархию элементов в онтологиях и взаимоотношения с другими системами онтологий.

Параметры  $P$  в онтологии представляют описание каждого элемента, необходимое для его идентификации в соответствующей области.

Параметр времени  $t$  в онтологиях необходим для определения последовательности решения подзадач в рамках решаемой задачи.

Представление онтологий по предлагаемому способу достаточно просто и позволяет целенаправленно строить автоматизированные системы проектирования и управления в машиностроении. Подход гарантирует отсутствие избыточности информации, что может затруднить процесс проектирования, и сходен с организацией естественного мышления человека (проектировщика).

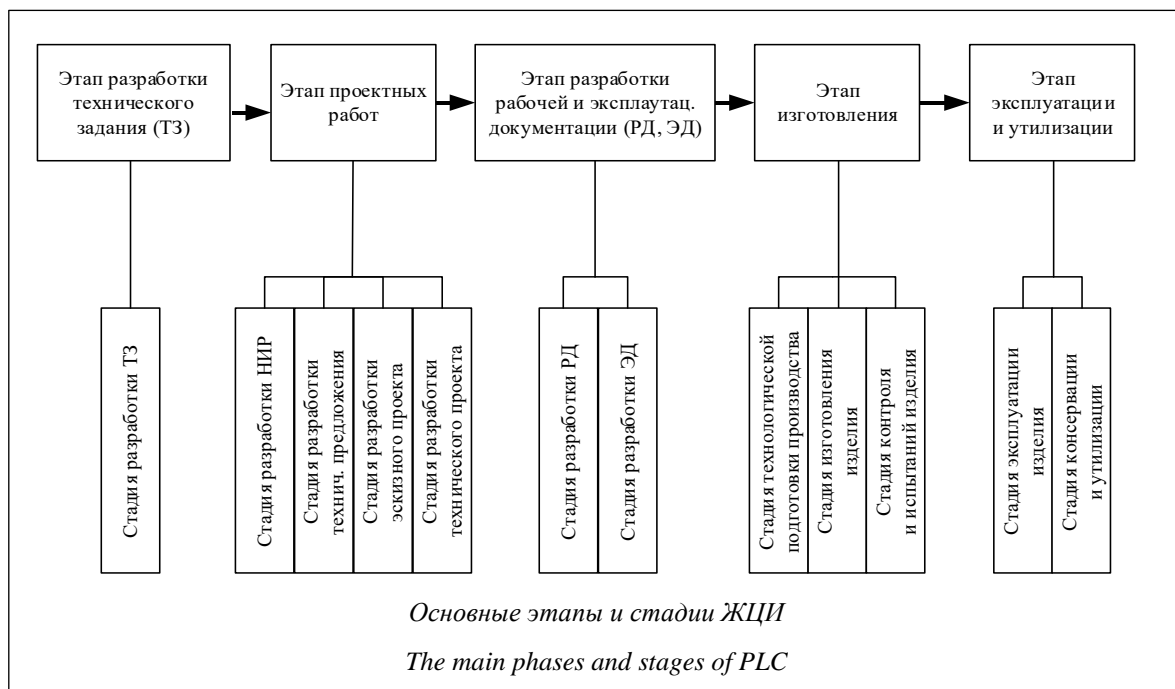
**Интеграция с системами поддержки ЖЦИ.** Методология ЖЦИ [8–10] также может быть инструментальным средством для разработки онтологий. Типовая структура ЖЦИ представлена на рисунке.

Отметим, что связи между системами онтологий для решения задач целесообразно ограничивать одним этапом ЖЦИ, так как в этом случае решаются родственные задачи и системы онтологий будут связаны смысловым аспектом.

Если не учесть данный факт, системы онтологий будут связаны только зависимостью по времени и иметь мало общих областей по элементам и параметрам.

Если развернуть все этапы ЖЦИ, то получим следующие стадии работ.

- Этап технического задания – стадия разработки технического задания (1).
- Этап проектных работ (проектирования изделия) – стадии выполнения НИР (2), разработки технического предложения (3), разработки эскизного проекта (4), разработки технического проекта (5).
- Этап рабочей и эксплуатационной документации – стадии разработки рабочей документации (6), разработки эксплуатационной документации (7).



- Этап изготовления – стадии технологической подготовки производства (8), изготовления изделия, включая управление изготовлением (9), контроля и испытаний изделия (10).
- Этап эксплуатации и утилизации – стадии эксплуатации изделия (11), утилизации изделия (12).

Выявленные двенадцать стадий характеризуются тем, что в рамках каждой из них решается одна задача, свойственная для машиностроительного производства. Это значит, что для осуществления процесса проектирования в автоматизированной системе для данной стадии ЖЦИ строится и реализуется одна система онтологий *O*.

В рамках одного этапа реализуются несколько систем онтологий *O*, связанных между собой, как имеющие значительные области пересечения.

Следует заметить, что состав стадий ЖЦИ приведен на примере одного из машиностроительных предприятий. В каждом конкретном случае он, как и состав систем онтологий, реализуемых в автоматизированных системах, должен быть уточнен на основе изучения процессов деятельности организации.

**Учет процессов деятельности организации.** Для исследования современных машиностроительных систем главное – определить задачи, реализуемые на предприятии, то есть выявить структуру и функции процессов. Эти действия необходимо выполнять в следующем порядке [11–14].

В первую очередь следует выявить функции, реализуемые в производственной системе, и для каждой из них определить, какие процессы (действия), выполняемые на протяжении ЖЦИ в рассматриваемой производственной системе, влияют на качество реализации функции, то есть на процесс принятия решения (обозначим их как процессы группы 1). Функции выявляются на основе анализа их целей.

Как правило, такими действиями могут быть научно-исследовательская работа, конструкторская и технологическая подготовка производства, изготовление (с планированием и управлением изготовлением и контролем) и испытания. Понятно, что этими процессами надо управлять, поэтому появляется верхний уровень управления (определение технического задания и собственно управление этапами ЖЦИ).

Процессы 1-й группы не могут существовать сами по себе, поэтому следует выявить процессы (действия), непосредственно не влияющие на процесс принятия решения, но необходимые для выполнения действий вида 1 (действия (процессы) группы 2). Например, подготовка различной технической документации, организация документооборота и т.д.

Таким образом, совокупность этих действий 1-й и 2-й групп и будет составлять суть процессов, реализуемых на предприятии.

Далее необходимо детализировать процессы, разбив их на операции. Каждая операция должна иметь законченный функциональ-

ный смысл, включать выполнение одной подфункции функции процесса.

Важно также найти золотую середину между концентрацией и дифференциацией действий в операции с учетом квалификации будущих пользователей автоматизированной системы, построенной на онтологиях, и возможности принятия ими самостоятельных решений.

Далее следует упорядочить по времени процессы 1-й группы и соотнести их с этапами и стадиями жизненного цикла.

Затем необходимо привязать процессы группы 2 к процессам 1-й группы по времени. Немаловажным является и определение ответственного за тот или иной процесс на каждом уровне, так как в работу включены участники из разных (по административной структуре) подразделений. Этот шаг необходим для придания автоматизированной системе сервис-ориентированной структуры и выявления наиболее важного пользователя системы. Сложность состоит в том, что участвующие в

процессе подразделения организации уже имеют своих руководителей. Как правило, осуществлять руководство должен наиболее грамотный (досконально понимающий суть процесса) из руководителей участвующих подразделений.

### Заключение

Попытка использовать имеющиеся разработанные онтологии для машиностроительного производства оказалась малоуспешной, так как они по сути отражали лишь предметную область, не выделяя в ней области решений, задач, исходных данных и не показывая связи между ними.

Предлагаемый авторами подход планируется реализовать на одном из предприятий Тверского региона. Практика показала, что он понятен разработчикам системы, имеющим профессиональное представление о предметной области реализации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-37-50084.*

### Литература

1. Бурдо Г.Б., Воробьева Е.В. Онтологический подход при проектировании технологических процессов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: матер. IV Междунар. науч.-технич. конф. OSTIS. Республика Беларусь, Минск, 2015. С. 461–464.
2. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования. М.: Изд-во МГТУ, 2009. 336 с.
3. Поздеев Б.М. Управление знаниями и интеллектуальная поддержка принятия решений на этапах проектирования и производства машиностроительных изделий // IX конф. по искусственному интеллекту (КИИ): сб. тр. М., 2004. Т. 3. С. 1039–1050.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М., 2007. 272 с.
5. Корсаков В.С., Капустин Н.М., Темпельхоф К.Х. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1986. 204 с.
6. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.
7. Маталин А.А. Технология машиностроения. СПб: Машиностроение, 2006. 512 с.
8. Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.
9. Никифоров А.Д., Бакиев А.В. Процессы жизненного цикла продукции в машиностроении. М.: Абрис, 2011. 688 с.
10. Яблочников Е.И. Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmartTeam // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 3. С. 22–29.
11. Бурдо Г.Б., Совершенствование технологической подготовки машиностроительного производства // СТИН. 2016. № 7. С. 2–8.
12. Вумек Д.П., Джонс Д.Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М., 2008. 473 с.
13. Смирнова Н.В. Как не наступить на грабли при переходе на процессное управление // Управление производством. 2009. № 3. С. 26–32.
14. Бурдо Г.Б., Стоянова О.В. Автоматизированная система управления процессами создания наукоемких машиностроительных изделий // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 164–170.

## Approaches to creating ontologies for automated systems in machine-building industries

G.B. Burdo <sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Chair, gbtms@yandex.ru

N.A. Semenov <sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor

N.V. Vorontsov <sup>2</sup>, Postgraduate Student

<sup>1</sup>Tver State Technical University, Nikitin Quay 22, Tver, 170026, Russian Federation

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

**Abstract.** Most domestic machine-building enterprises that produce high-tech products have a characteristic by a product multiplicity, frequent changes in product types, and it is necessary to reduce the time period provided for the implementation of the product life cycle stages. This is possible by using automated design and manufacturing systems.

The ontological approach to the creation of automated systems is quite promising, but its application may be hampered by the use of not entirely rational methods. The authors considered system principles and gave the subject system mathematical description of ontologies. The ontology function is a feature that defines the ontology system and follows from the goals of ontology development.

In addition to the function, the authors proposed to define an ontology system by a set of elements; links between the elements of this ontology system with other ontology systems; parameters of each element in the ontology; time parameter; ontology by the solution area; source data area; and problem area.

Based on the product life cycle methodology, the authors showed that the identified 12 stages of the life cycle have a characteristic by the fact that within each of them one problem has a solution, which is typical for machine-building production. This means that there is a single ontology system for the design process in an automated system for this stage, and within a single stage there are several ontology systems linked together as having significant areas of intersection. In each case, the composition of the product life cycle stages needs to be clarified. There is an assumption to specify such stages, as well as to specify the tasks to be solved at the stages of the product life cycle based on the study of the organization's processes.

**Keywords:** automated design and control systems, mechanical engineering, ontology, product life cycle, process management, system approach.

**Acknowledgements.** The paper was with the financial support of the RFBR, project no. 19-37-50084.

### References

1. Burdo G.B., Vorobeva E.V. An ontological approach to the design of technological processes. *Proc. 4th Intern. Conf. OSTIS*, Belarus, Minsk, 2015, pp. 461–464 (in Russ.).
2. Evgenev G.B. *Intelligent Design Systems*. Moscow, MSTU Publ., 2009, 336 p. (in Russ.).
3. Pozdeev B.M. Knowledge management and intellectual decision-making support at design and production stages of engineering products. *Proc. 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, vol. 3, pp. 1039–1050 (in Russ.).
4. Kondakov A.I. *CAD for Technological Processes*. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 272 p. (in Russ.).
5. Korsakov V.S., Kapustin N.M., Tempelhof K.H. *Automation of Technological Process Design in Mechanical Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 204 p. (in Russ.).
6. Tsvetkov V.D. *System and Structural Modeling and Automation of Technological Process Design*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979, 264 p. (in Russ.).
7. Matalin A.A. *Mechanical Engineering Technology*. St. Petersburg, Mashinostroenie Publ., 2006, 512 p. (in Russ.).
8. Kolchin A.F., Ovsyannikov M.V., Strelalov A.F., Sumarokov S.V. *Product Lifecycle Management*. Moscow, Anaharsis Publ., 2002, 304 p. (in Russ.).
9. Nikiforov A.D., Bakiev A.V. *Product Life Cycle Processes in Mechanical Engineering*. Moscow, Abris Publ., 2011, 688 p. (in Russ.).
10. Yablochnikov E.I. Organization of a unified information space for technical production preparation using PDM SmarTeam. *Information Technologies in Design and Production*, 2009, no. 3, pp. 22–29 (in Russ.).
11. Burdo G.B. Improving the technological preparation of engineering production. *STIN*, 2016, no. 7, pp. 2–8 (in Russ.).
12. Womack J.P., Jones D.T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Free Press, 2003, 396 p. (Russ. ed.: Moscow, 2008, 473 p.).

13. Smirnova N.V. How not to step on the rake during the transition to process management. *Production Management*, 2009, no. 3, pp. 26–32 (in Russ.).

14. Burdo G.B., Stoyanova O.V. Automated control system for science-based mechanical engineering product development. *Software & Systems*, 2014, no. 2, pp. 164–170 (in Russ.).

#### Для цитирования

Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Воронцов Н.В. Подходы к созданию онтологий для автоматизированных систем в машиностроительных производствах // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 304–309. DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309.

#### For citation

Burdo G.B., Semenov N.A., Vorontsov N.V. Approaches to creating ontologies for automated systems in machine-building industries. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 304–309 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309.

УДК 519.711.3+ 622.691.4  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.310-318

Дата подачи статьи: 19.03.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 310–318

## **Архитектура и режимы функционирования системы поддержки принятия решений по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения**

*Р.Р. Кантюков*<sup>1,2</sup>, к.т.н., доцент, зам. генерального директора по науке, *logist@muctr.ru*

<sup>1</sup> *НИИ природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ, Московская обл., Ленинский р-н, 142717, Россия*

<sup>2</sup> *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, 125047, Россия*

В статье описываются разработанная система поддержки принятия решений по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения, ее архитектура, режимы функционирования и программно-информационное обеспечение.

Система создана на универсальной программной платформе 1С:8 с открытой архитектурой. Архитектура системы поддержки принятия решений включает восемь программных модулей, а также автоматизированное рабочее место диспетчера центра, которое имеет подсистему визуализации процессов газоснабжения и газораспределения.

Назначение системы поддержки принятия решений – обеспечить контроль за технологическим процессом транспорта газа, управление запорной арматурой с целью отключения ремонтных или аварийных участков региональной системы газоснабжения, предотвращение или локализация возможных аварий. Все данные, собранные системой на объектах региональной системы газоснабжения (крановые площадки, газораспределительные станции, головные газораспределительные пункты, шкафные распределительные пункты), передаются в диспетчерский центр на автоматизированное рабочее место и отображаются на мнемосхеме в удобной форме. Далее эта информация передается в центральную диспетчерскую, где на мнемосхеме отображается уже вся распределительная газопроводная система.

Система поддержки принятия решений имеет инструменты взаимодействия с такими функционально-организационными автоматизированными системами, как автоматизированная система бухгалтерского и налогового учета, автоматизированная система мониторинга и обеспечения безопасности объектов региональной системы газоснабжения, включая автоматизированную систему коммерческого учета расхода газа и управления устройствами контроля утечек газа в бытовых производственных помещениях, АСУ энергоресурсоэффективностью и контроллингом энергоресурсоэффективности, АСУ персоналом на основе повышения мотивации персонала к развитию информатизации и широкому применению средств информационно-компьютерных технологий.

Разработанная система поддержки принятия решений по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения предназначена для принятия многоатрибутных и многокритериальных решений в задачах контроля и управления газораспределением между потребителями в региональных системах газоснабжения.

**Ключевые слова:** *система поддержки принятия решений, программно-информационное обеспечение, автоматизированное рабочее место, система газоснабжения.*

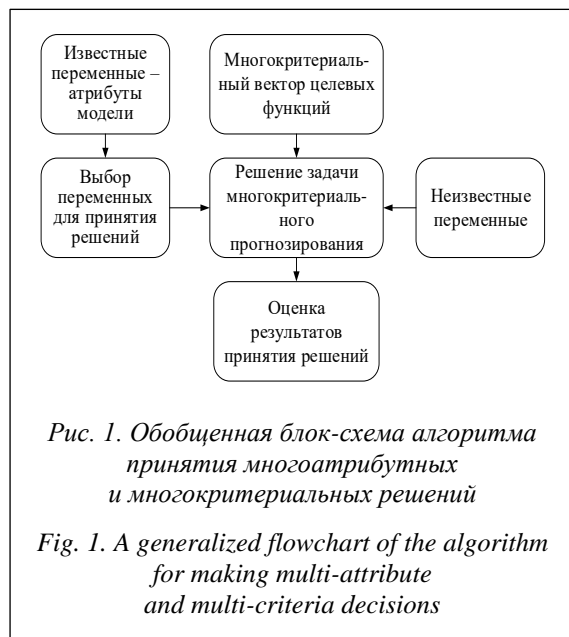
Управление надежной энергоресурсоэффективной сложной системой газоснабжения (ССГ) и контроль за ее эксплуатацией – наиболее важные региональные задачи [1–4]. Для их решения разработана и внедрена система поддержки принятия решений (СППР) диспетчерско-организационного управления объектами газоснабжения [1, 2]. Основными функциональными задачами СППР являются следующие: оперативный сбор, хранение и представление информации о хозяйственно-экономиче-

ской деятельности ССГ низкого давления; автоматизация бизнес-процессов учета и хранения информации о составе и техническом состоянии ССГ и оборудования; автоматизация бизнес-процессов по оказанию услуг различным потребителям, в том числе населению, с обеспечением контроля всего баланса потребления газа [5].

Принятие решений в разработанной системе основано на многоатрибутном и многокритериальном методах. Обобщенная блок-



схема алгоритма принятия многоатрибутных и многокритериальных решений представлена на рисунке 1.



Неизвестные переменные модели принятия решений выделены в отдельный блок, что подчеркивает их значительное влияние на результаты принятия решений. Решение задачи многоатрибутного принятия решений основано на использовании различных операторов свертки, задача которых – преобразование многоатрибутных характеристик (показателей) в суммарные интегральные характеристики (показатели). Например, в качестве оператора свертки можно использовать оператор средневзвешенного преобразования вектора  $x$  в скалярный интегральный показатель

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^m a_i x_i, \quad \sum_{i=1}^m a_i = 1, \quad (1)$$

где  $x_i$  – известные параметры-атрибуты;  $m$  – количество известных параметров-атрибутов;  $a_i$  – весовые коэффициенты [6, 7].

С учетом неизвестных параметров формулу (1) можно переписать следующим образом:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{j=m+1}^n a_j y_j, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad (2)$$

где  $x_i$  – известные параметры-атрибуты;  $y_j$  – неизвестные параметры;  $m$  – количество известных параметров-атрибутов;  $n$  – общее количество параметров.

С помощью формулы (2) можно оценить эффективность многоатрибутной средневзвешенной оценки (1) по формуле

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m a_i x_i}{\sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{j=m+1}^n a_j y_j}. \quad (3)$$

Здесь многоатрибутная оценка считается адекватной при  $\eta > 0.8$ .

Аналогичная проблема выбора оператора свертки для преобразования вектора целевых функций в скалярную целевую функцию возникает для многокритериальных задач принятия решений. При этом аналогом метода средневзвешенного является метод линейной свертки, при котором преобразование задачи многокритериального принятия решений в однокритериальную задачу осуществляется по формуле

$$F(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) \rightarrow \max(\min), \quad \sum_{i=1}^m a_i = 1, \quad (4)$$

где  $x$  – вектор параметров;  $f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – скалярные функции векторного аргумента.

В качестве операторов свертки могут использоваться и другие операторы [7], например:

– оператор минимума

$$F_{\min}(x) = \min_i (f_i(x)); \quad (5)$$

– оператор максимума

$$F_{\max}(x) = \max_i (f_i(x)); \quad (6)$$

– оператор среднего арифметического

$$F_{av}(x) = \frac{F_{\min}(x) + F_{\max}(x)}{2}; \quad (7)$$

– геометрический оператор

$$F_g(x) = \sqrt{F_{\min}^2(x) + F_{\max}^2(x)}. \quad (8)$$

Для задач принятия решений с дискретными векторными аргументами возможны более сложные операторы свертки [7], например:

– минимаксный оператор

$$F_{mm} = \max_i \left( \min_x (f_i(x)) \right); \quad (9)$$

– оператор Байеса–Лапласа

$$F_{mm} = \max_i \left( \sum_x p^T(x) \cdot f_i(x) \right), \quad (10)$$

где  $x$  – вектор возможных состояний системы (комбинаций значений параметров);  $f_i = f_i(x)$ ,  $p^T(x)$  – вектор вероятностей различных состояний системы ( $\sum_x p^T(x) = 1$ ).

Для принятия решений в задачах управления конкретными организационными системами используются различные методы оптимизации. В работе [8] для принятия решений

использованы методы имитационного моделирования, в данной работе – описанные выше многоатрибутные и многокритериальные методы.

Рассмотрим основные архитектурные и функциональные особенности разработанной СППР по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения.

### Архитектура и режимы функционирования СППР

Блок-схема архитектуры СППР представлена на рисунке 2, где каждый из укрупненных блоков предназначен для выработки вариантов принятия решений в соответствующей области организационного управления объектами ССГ. СППР разработана на универсальной программной платформе 1С:8 с открытой архитек-

турой и успешно функционирует с начала 2010-х годов в ПАО «Газпром трансгаз Казань».

Архитектура СППР включает 8 основных программных модулей (рис. 2). Рассмотрим подробнее наиболее важные из них.

В модуле М1 вырабатываются варианты многоатрибутных и многокритериальных решений по техническим условиям, которым должны удовлетворять новые объекты ССГ. Модуль включает три блока (рис. 3). В блоке 1 вырабатываются варианты решений о регистрации заявки с учетом различных условий подключения новых объектов, в блоке 2 – варианты решений с учетом различных технических характеристик подключаемых объектов ССГ, в блоке 3 – окончательные варианты решений о технических параметрах и технических условиях присоединения новых объектов к ССГ.

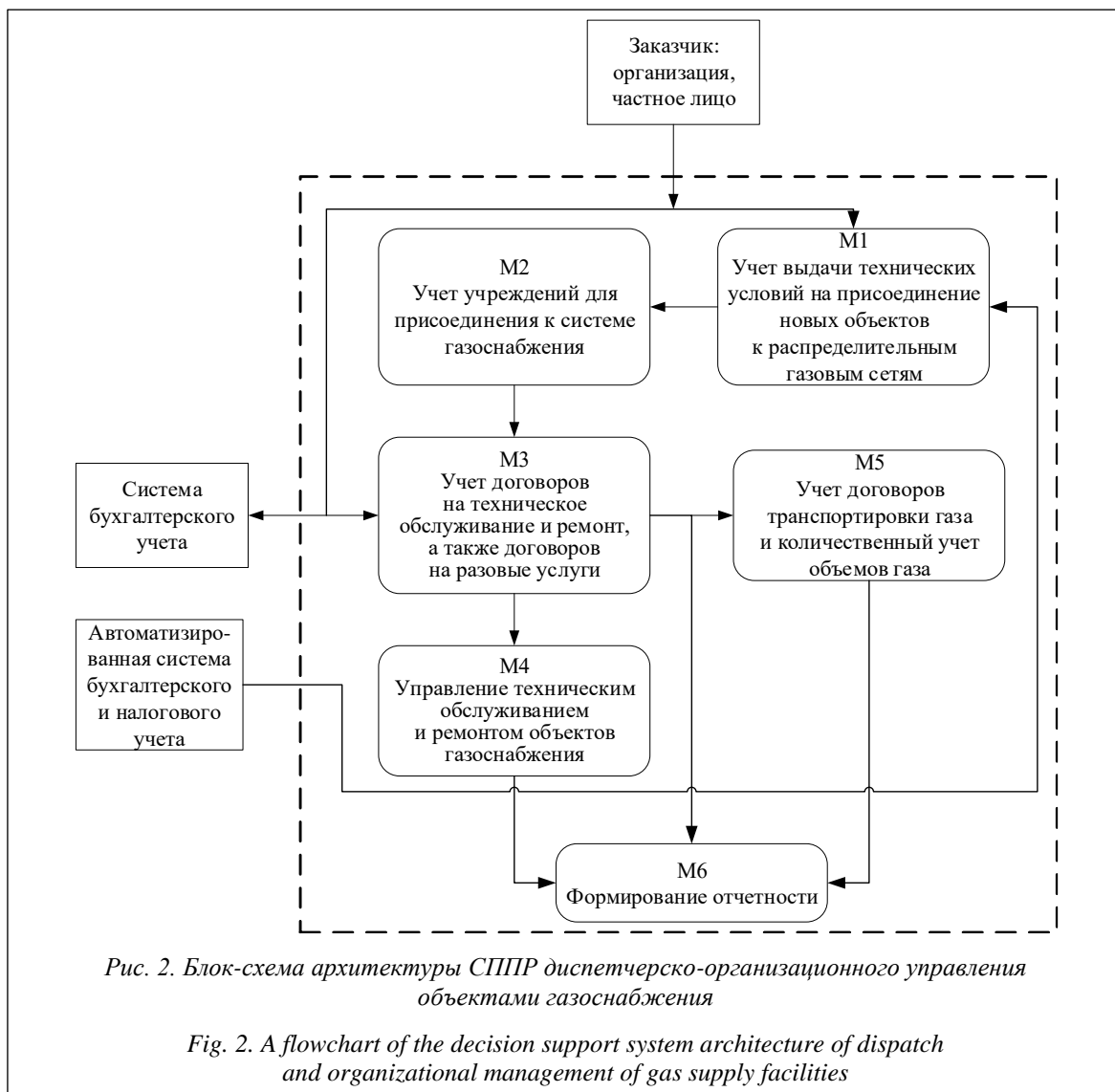


Рис. 2. Блок-схема архитектуры СППР диспетчерско-организационного управления объектами газоснабжения

Fig. 2. A flowchart of the decision support system architecture of dispatch and organizational management of gas supply facilities

Модуль 3 включает четыре блока (рис. 4). В блоке 1 вырабатываются варианты технических решений о поставках газа, в блоке 2 – о конкретных формах и реализациях технического обслуживания, в блоке 3 – варианты многоатрибутных и многокритериальных решений о соответствии объемов поставок газа и условиях поставки (например, о технических условиях, обеспечивающих оптимизацию целевых функций, о максимальной прибыли в конкретных условиях функционирования реальных газовых сетей ССГ), в блоке 4 – варианты решений о соответствии или несоответствии объемов поставок газа заключенным договорам.

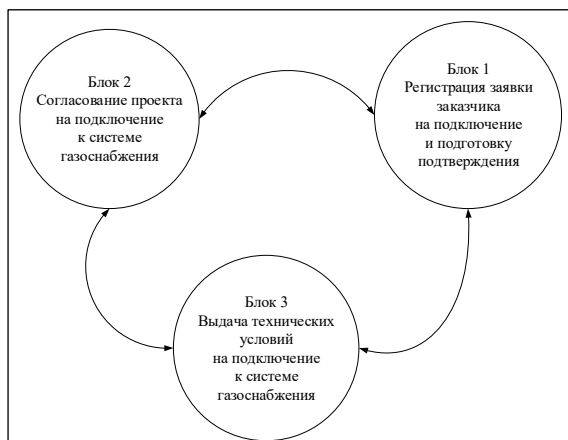


Рис. 3. Функциональная схема модуля M1

Fig. 3. A functional diagram of M1 module

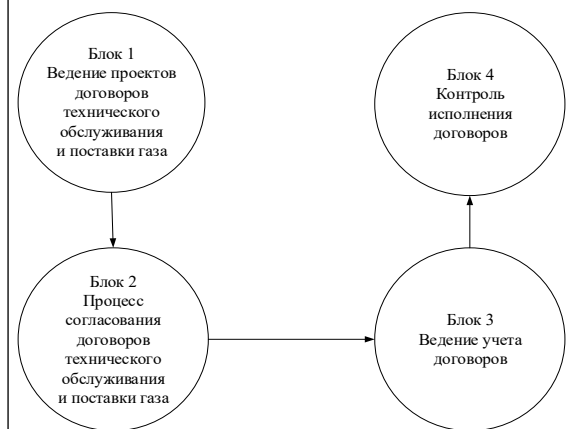


Рис. 4. Функциональная схема модуля M3

Fig. 4. A functional diagram of M3 module

Модуль 5 включает три блока (рис. 5). В блоке 1 вырабатываются многоатрибутные и многокритериальные варианты решений о недопоставках газа или о превышении лимитов поставок газа по конкретным объектам газоснабжения, в блоке 2 – варианты решений о

суммарных объемах поставок газа по всем объектам газоснабжения, в блоке 3 – варианты решений о соответствии реальных поставок газа заключенным с объектами газоснабжения договорам.

Модуль программно-технического администрирования СППР предназначен для выработки вариантов многоатрибутных и многокритериальных решений по настройке, отладке и обслуживанию технического оборудования и программно-информационного обеспечения (например, решений о совершенствовании программного интерфейса взаимодействия пользователей с СППР).

Модуль обмена данными со смежными автоматизированными системами (АС) предназначен для управления БД и включает три блока (рис. 6). В блоках 1 и 2 вырабатываются варианты решений по управлению СППР с по-



Рис. 5. Функциональная схема модуля M5

Fig. 5. A functional diagram of M5 module

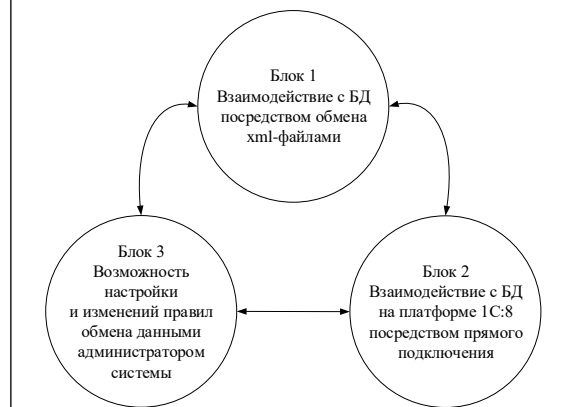


Рис. 6. Функциональная схема модуля обмена данными со смежными АС

Fig. 6. A functional diagram of the data exchange module with other automated control systems

мощью информации, хранящейся в БД, блок 3 позволяет использовать возможности системного администратора в управлении БД.

Разработанная СППР имеет интерфейсы с основными функционально-организационными автоматизированными системами: региональной газотранспортной и газораспределительной организацией; АС бухгалтерского и налогового учета; АС мониторинга и обеспечения безопасности объектов *региональной системы газоснабжения* (РСГ), включая АС коммерческого учета расхода газа и управления устройствами контроля утечек газа в бытовых и производственных помещениях; АС *контроллинга энергоресурсоэффективности* (КЭР), оперативного учета договоров контрагентов; АС управления персоналом на основе повышения мотивации персонала к развитию цифровизации и широкому применению средств *информационно-коммуникационных технологий* (ИКТ), а также стимулирующей системы расчета заработной платы.

Управление и контроль за транспортировкой и доставкой газа различным потребителям, а также управление эксплуатацией энерго-ресурсоэффективной РСГ осуществляет диспетчерская служба. Для обеспечения в режиме реального времени управления и оперативного контроля за эксплуатацией *магистральной и региональной газопроводных систем* (МГПС и РГПС) разработаны архитектура и режимы функционирования многоуровневой АС *телеметрического контроля и управления* (АС-ТКУ) [9–11]. Назначение АС-ТКУ – обеспечение контроля за технологическим процессом транспорта газа, управление запорной арматурой с целью отключения ремонтных или аварийных участков РСГ, предотвращение или локализация возможных аварий (рис. 7).

Все данные, собранные АС-ТКУ на объектах ССГ (крановые площадки, шкафные распределительные пункты и др.), передаются в СППР диспетчерского центра на АРМ подразделения и визуализируются на мнемосхеме. Разработанная телеметрическая

система диспетчеризации всех ССГ как важнейшая подсистема АРМ (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/19.jpg>) использует отечественную контрольно-измерительную аппаратуру, в том числе датчики давления и загазованности [12, 13].

Важную роль в разработанной СППР играет программное средство «Монитор телеметрии 2» (МТ2). Рассмотрим подробнее его основные элементы [14, 15].

ПО МТ2 предназначено для просмотра и анализа телеметрических данных в режиме реального времени, построения отчетов, оповещения о нештатных ситуациях, удаленной настройки и управления объектами, а также для настройки опроса объектов сервером телеметрии и управления пользовательскими аккаунтами, работающими в системе. Главное окно МТ2 представлено на рисунке 8, а отображение мнемосхем – на рисунке 9.

ПО МТ2 построено на архитектуре клиент-сервер и является единой программной оболочкой для объектов газораспределения:

- газораспределительные пункты;
- газораспределительные станции;
- станции электрохимической защиты газопроводов;
- контрольно-измерительные пункты;
- крановые узлы и другое газораспределительное оборудование.

ПО данной системы обеспечивает:

- возможность работы в системах до 5 000 объектов;

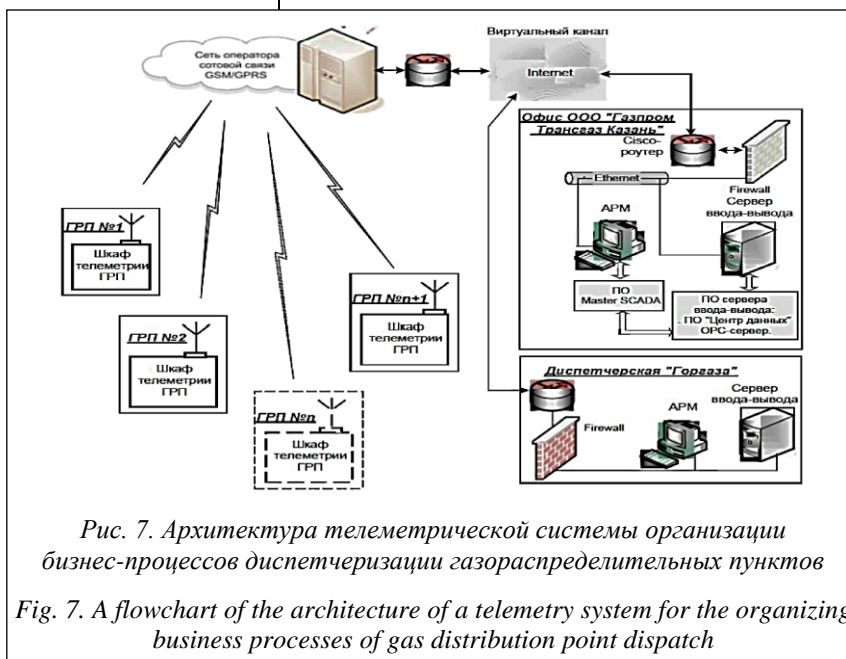


Рис. 7. Архитектура телеметрической системы организации бизнес-процессов диспетчеризации газораспределительных пунктов

Fig. 7. A flowchart of the architecture of a telemetry system for the organizing business processes of gas distribution point dispatch

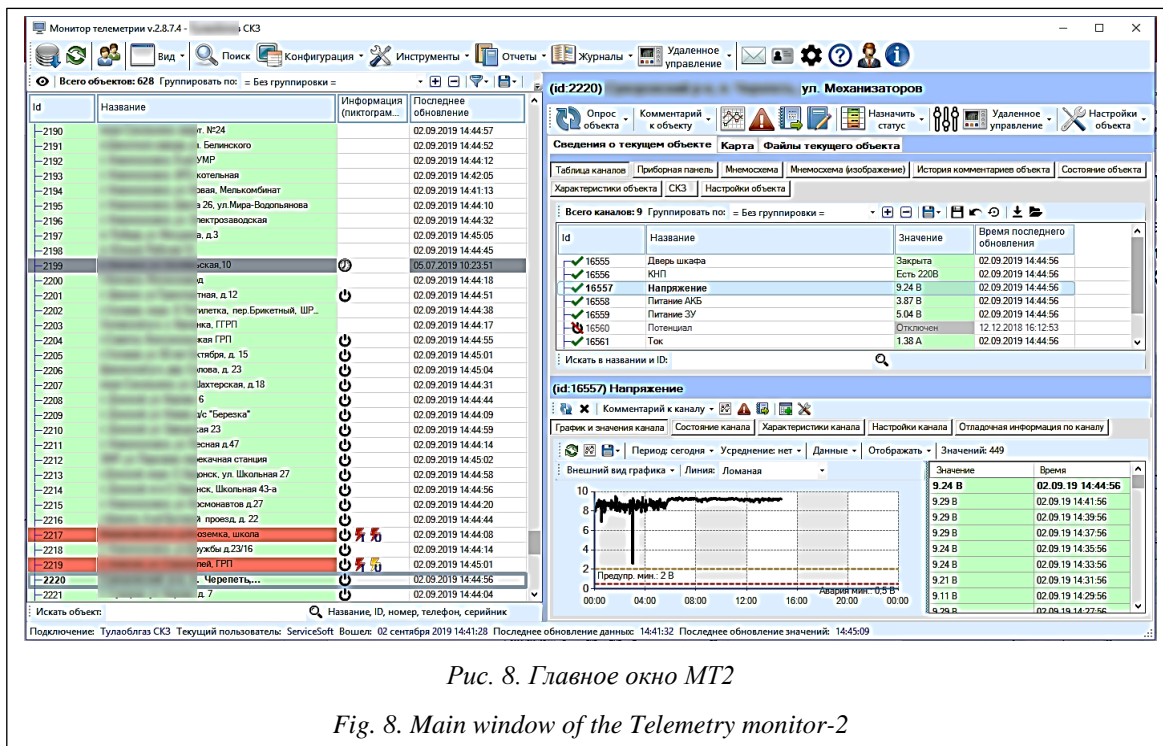


Рис. 8. Главное окно МТ2

Fig. 8. Main window of the Telemetry monitor-2

- возможность работы в закрытых локальных сетях без доступа во внешний Интернет;
- гибкую настройку внешнего вида программы, удобство работы на мониторах с разным соотношением сторон;
- отображение всей полноты данных в одном активном окне без необходимости дополнительно размещать вспомогательные инструменты, выбор между представлением данных в виде таблиц, мнемосхем, графиков или приборных панелей.

Система иерархически распределяет отображение объектов по региональным службам, подразделениям и пользователям.

Системные требования ПО МТ2 при сохранении производительности: 1 024 Мб оперативной памяти, одноядерный процессор 2.0 ГГц и 500 Мб на жестком диске.

Возможности ПО МТ2:

- отображение объектов и каналов в виде таблиц с возможностью группировки и сортировки, выбора колонок (более 50 шт. для объектов и 25 шт. для каналов) и порядка их следования, фильтрации, а также сохранения индивидуальной конфигурации таблиц в профиль пользователя;
- отображение автоматической настраиваемой приборной панели или созданной вручную мнемосхемы, показывающих текущие значения каналов, аварийные состояния и время сбора данных;

- отображение объектов на не требующей дополнительной оплаты масштабируемой географической карте цветными маркерами разной формы в зависимости от аварийного состояния и типа объекта;
- возможность локального разворачивания сервера карт в локальных сетях для ПК, не имеющих доступа во внешний Интернет;
- отображение сведений по объектам и каналам: информации о пуско-наладочных работах, проверке, сервисном обслуживании, настройке, подробные сведения о получении и обработке значения сервером телеметрии, све-

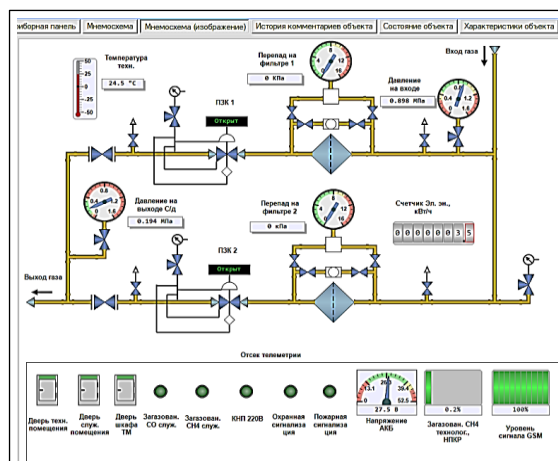


Рис. 9. Отображение мнемосхем объекта

Fig. 9. Display of mnemonic diagrams

дения об установленном оборудовании и вычисляемые характеристики;

- широкий спектр настроек для отображения значения каналов (точность, единица измерения, незначащие нули, способ усреднения, тип данных, функциональное значение, принадлежность устройству, группе, уставки, таймауты устаревших и сильно устаревших данных и т.д.);

- отображение на одной координатной плоскости сразу нескольких графиков, в том числе по разным объектам;

- построение оперативных графиков по любому каналу объекта за последние час, 4 часа, 12 часов, сутки, 2 суток.

## Заключение

Разработанная СППР по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения предназначена для принятия многоатрибутных и многокритериальных решений в задачах контроля и управления газораспределением между потребителями в региональных системах газоснабжения. В программной реализации СППР использованы средства программирования пакета компьютерной математики Матлаб, программные средства MS Visual Studio, а также средства универсальной программной платформы 1С:8 с открытой архитектурой.

*Автор благодарен В.Н. Ахметовой за участие в разработке архитектуры системы поддержки принятия решений.*

## Литература

1. Кантюков Р.А., Мешалкин В.П., Смирнов Л.А., Дли М.И., Ахметова В.Н., Попов А.Г., Казанский Г.М. Организация информатизации газотранспортных предприятий с учетом человеческого потенциала. Смоленск, 2014. 143 с.
2. Кантюков Р.А., Ахметова В.Н., Кантюков Р.Р., Сорвачев А.В., Ахметзянов А.М., Сусликов Э.В., Фаляхов И.В. Практическое использование комплекса программ расчета динамики роторов нагнетателей с электромагнитными подшипниками // XXVI Междунар. Чугаевская конф. по координационной химии: сб. тр. науч.-практич. семинара. 2014. С. 41–47.
3. Ramachandra T.V., Krishna S.V., Shruthi B.V. Decision support system for regional domestic energy planning. J. Sci. Ind. Res., 2005, vol. 64, pp. 163–74.
4. Djebedjiana Berge, El-Naggara Mohamed, Shahin Islam. Optimal decision of gas distribution network: A case study. MEJ, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 35–51.
5. Bonnans André J.F., Cornibert L. Optimization of capacity expansion planning for gas transportation networks. EJOR, 2009, vol. 197, iss. 3, pp. 1019–1027.
6. Gwo-Hshiang Tzeng, Jih-Jeng Huang. Multiple attribute decision making: Methods and applications. CRC Press, 2011, 350 p.
7. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990. 208 с.
8. Локтаев С.В. Математические модели и методы принятия решений при управлении организационными системами: автореф. дис... докт. технич. наук. СПб: СПбГПУ, 2009. 45 с.
9. Wu Y., Lai K.K., Liu Y. Deterministic global optimization approach to steady-state distribution gas pipeline networks. Optimization and Engineering, 2007, vol. 8, no. 3, pp. 259–275.
10. González Herrán A., De La Cruz J.M., De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. Applied Mathematical Modeling, 2009, vol. 33, iss. 3, pp. 1584–1600.
11. Chebouba A., Yalaoui F., Smati A., Amodeo L., Younsi K., Tairi A. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization. Computers and Operations Research, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 1916–1923.
12. de Mélo Duarte H., Goldbarg E.F.G., Goldbarg M.C. A tabu search algorithm for optimization of gas distribution networks. LNCS, Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, 2006, vol. 3906, pp. 37–48.
13. Olorunniwo F.O., Jensen P.A. Optimal capacity expansion policy for natural gas transmission networks – a decomposition approach. Engineering Optimization, 1982, vol. 6, pp. 13–30.
14. Ларкин Е.В., Панарин М.В., Горюноква А.А., Семин И.В. Телеметрический комплекс контроля дозрывных концентраций газа в многоквартирных домах // Изв. Тульского гос. ун-та: Технич. науки. 2010. Вып. 4. Ч. 2. С. 125–128.
15. Кантюков Р.А., Мешалкин В.П., Панарин В.М., Горюноква А.А., Гимранов Р.К., Рыженков И.В., Кантюков Р.Р. Информационно-измерительная система управления территориально-удаленными объектами в газотранспортном хозяйстве // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 3. С. 51–62.

## Architecture and functioning modes of a decision support system for dispatch and organizational management of gas supply facilities

**R.R. Kantyukov**<sup>1,2</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director on Scientific Work, [logist@muctr.ru](mailto:logist@muctr.ru)

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies – VNIIGAZ, Moscow Reg., 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russian Federation, Moscow, 125047, Russian Federation

**Abstract.** The paper describes the developed decision support system for dispatch and organizational management of gas supply facilities, its architecture, operating modes and software.

The system has been created on a universal software platform 1C:8 with an open architecture. The decision support system architecture includes eight software modules, a center dispatcher's workstation with a subsystem for visualizing gas supply and gas distribution processes.

The purpose of the decision support system is to provide control over a technological process of gas transportation; to control valves to disable repair or emergency sections of the regional gas supply system, to prevent or localize possible accidents. All data collected by the system at the facilities of the regional gas supply system (crane platforms, gas distribution stations, head gas distribution points, cupboard distribution points) are transferred to the Dispatch center for an automated workstation and displayed on a mnemonic diagram in a convenient form. Further, this information is transmitted to the Central dispatch, where the entire distribution gas pipeline system is already displayed on the main mnemonic diagram.

The decision support system has tools for interaction with other functional and organizational automated systems, such as an automated system of accounting and tax records, an automated system for monitoring and ensuring the safety of facilities of the regional gas supply system including an automated system for commercial metering of gas consumption and control of gas leakage control devices in domestic production facilities, an automated system for managing energy and resource efficiency and controlling energy and resource efficiency, an automated personnel management system based on increasing staff motivation for the development of informatization and the widespread use of information and computer technologies.

The developed decision support system of dispatch and organizational management of gas supply facilities is designed to make multi-attribute and multi-criteria decisions in the problems of monitoring and managing gas distribution between consumers in regional gas supply systems.

**Keywords:** decision support system, software and information support, workstation, gas supply system.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to V.N. Akhmetova for participating in the development of the decision support system architecture.

### References

1. Kantyukov R.A., Meshalkin V.P., Smirnov L.A., Dli M.I., Akhmetova V.N., Popov A.G., Kazansky G.M. *Organization of Informatization of Gas Transportation Enterprises Taking into Account Human Potential*. Smolensk, 2014, 143 p. (in Russ.).
2. Kantyukov R.A., Akhmetova V.N., Kantyukov R.R., Sorvachev A.V., Akhmetzyanov A.M., Suslikov E.V., Falyakhov I.V. The practical use of a set of programs for calculating the dynamics of supercharger rotors with electromagnetic bearings. *Proc. Seminar XXVI Intern. Chugaev Conf. on Coordination Chemistry*, 2014, pp. 41–47 (in Russ.).
3. Ramachandra T.V., Krishna S.V., Shruthi B.V. Decision support system for regional domestic energy planning. *J. Sci. Ind. Res.*, 2005, vol. 64, pp. 163–74.
4. Djebedjiana Berge, El-Naggara Mohamed, Shahin Islam. Optimal decision of gas distribution network: A case study. *MEJ*, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 35–51.
5. Bonnans André J.F., Cornibert L. Optimization of capacity expansion planning for gas transportation networks. *EJOR*, 2009, vol. 197, iss. 3, pp. 1019–1027.
6. Gwo-Hshiung Tzeng, Jih-Jeng Huang. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press, 2011, 350 p.
7. Mushik E., Myuller P. *Entscheidungspraxis Ziele Verfahren Konsequenzen*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1987, 142 p. (Rus. ed.: Moscow, 1990, 208 p.).

8. Loktaev S.V. Mathematical models and decision-making methods in the management of organizational systems. *Thes. Dis.*, St. Petersburg, 2009, 45 p. (in Russ.).
9. Wu Y., Lai K.K., Liu Y. Deterministic global optimization approach to steady-state distribution gas pipeline networks. *Optimization and Engineering*, 2007, vol. 8, no. 3, pp. 259–275.
10. González Herrán A., De La Cruz J.M., De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, vol. 33, iss. 3, pp. 1584–1600.
11. Chebouba A., Yalaoui F., Smati A., Amodeo L., Younsi K., Tairi A. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization. *Computers and Operations Research*, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 1916–1923.
12. de Mélo Duarte H., Goldbarg E.F.G., Goldbarg M.C. A tabu search algorithm for optimization of gas distribution networks. *LNCS, Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, 2006, vol. 3906, pp. 37–48.
13. Olorunniwo F.O., Jensen P.A. Optimal capacity expansion policy for natural gas transmission networks – a decomposition approach. *Engineering Optimization*, 1982, vol. 6, pp. 13–30.
14. Larkin E.V., Panarin M.V., Goryunkova A.A., Semin I.V. Telemetric monitoring complex of pre-explosive gas concentrations in apartment buildings. *Bull. of Tula State Univ. Tech. Sci.*, 2010, iss. 4, pt. 2, pp. 125–128 (in Russ.).
15. Kantyukov R.A., Meshalkin V.P., Panarin V.M., Goryunkova A.A., Gimranov R.K., Ryzhenkov I.V., Kantyukov R.R. Information-measuring system for managing geographically remote facilities in the gas transportation sector. *Applied Informatics*, 2015, vol. 10, no. 3, pp. 51–62 (in Russ.).

#### Для цитирования

Кантюков Р.Р. Архитектура и режимы функционирования системы поддержки принятия решений по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 310–318. DOI: 10.15827/0236-235X.130.310-318.

#### For citation

Kantyukov R.R. Architecture and functioning modes of a decision support system for dispatch and organizational management of gas supply facilities. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 310–318 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.310-318.



УДК 621.372.83.001.24  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327

Дата подачи статьи: 21.10.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 319–327

## **Программное обеспечение автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций**

*В.С. Тынченко*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, *vadimond@mail.ru*

*В.Е. Петренко*<sup>1</sup>, аспирант, *dpblra@inbox.ru*

*А.В. Милов*<sup>1</sup>, аспирант, *antnraven@ieee.org*

<sup>1</sup> *Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева, кафедра информационно-управляющих систем, г. Красноярск, 660014, Россия*

В статье предлагается решение проблемы автоматизированного управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки узлов и деталей космических аппаратов. Анализируются особенности технологического процесса электронно-лучевой сварки, в результате чего становится очевидной необходимость его автоматизации с применением программной системы.

Использование разработанной автоматизированной системы позволяет повысить точность задания и воспроизводимость основных технологических параметров в процессе электронно-лучевой сварки, таких как ток луча, накал, фокусировка луча, скорость сварки. Программный продукт представляет собой приложение для операционной системы Windows, совместимое с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Приложение разработано с использованием языка программирования высокого уровня C++ и интегрированной среды разработки Embarcadero RAD Studio XE7. Разработка велась с использованием объектно-ориентированного подхода.

В статье приведены структура программной системы управления, алгоритм ее работы в виде блок-схемы, а также диаграмма экранных форм. Представленное в рамках данной статьи программное решение содержит функционал задания таких параметров технологического процесса электронно-лучевой сварки, как скорость сварки, ток пуска, время нарастания, время спада. ПО также решает задачу контроля ряда параметров: ускоряющее напряжение, скорость сварки, ток пучка, ток фокусировки и ток накала. Целевые параметры технологического процесса задаются пользователем вручную, а управление самим процессом реализуется в программном виде. Кроме того, возможен просмотр графиков данных параметров технологического процесса.

Апробация решения проводилась в рамках серии стендовых испытаний, результаты которых показали достаточно высокое качество управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки.

**Ключевые слова:** *автоматизированная система, автоматизированное управление, детали космических аппаратов, электронно-лучевая сварка, программный продукт, фокусировка луча.*

В современном мире достижения аэрокосмической промышленности находят все более широкое применение. Рост потребности в аэрокосмической технике в различных областях деятельности обуславливает необходимость разработки и производства все более совершенных космических летательных аппаратов различного назначения. Технологии производства оборудования для аэрокосмической отрасли тоже не стоят на месте. С развитием сложности элементной базы оборудования космических летательных аппаратов повышаются требования к технологичности, точности и качеству технологического процесса производства аэрокосмического оборудования. Раньше во многих технологических процессах произ-

водства аэрокосмической техники широко применялся метод аргонодуговой сварки, теперь же используется более точный и наукоемкий метод электронно-лучевой сварки.

Электронно-лучевая сварка уже прочно вошла в технологический цикл производства различных видов техники. В аэрокосмическом машиностроении такой метод находит широкое применение в силу незначительных тепловых деформаций соединяемых деталей вследствие кратковременности теплового воздействия и малого объема литого металла. Основой электронно-лучевой сварки является использование тепловой энергии, выделяющейся при торможении острогофокусированного потока электронов, ускоренных до высоких уровней

энергии. Само явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было известно еще в XIX веке, однако развитие данный источник нагрева получил только во второй половине XX века. Это связано с развитием вакуумной техники и электронной оптики.

Широкие возможности электронно-лучевой сварки позволяют использовать данную технологию для производства различных видов продукции. Например, авторами работы [1] технология электронно-лучевой сварки используется для получения канала подогрева лопаток входного направляющего аппарата газовых турбин. Свое применение электронно-лучевая сварка нашла также в ядерной промышленности. Проведенные авторами работы [2] исследования показали, что при электронно-лучевой сварке монокристаллов вольфрама обеспечиваются условия для эпитаксиальной кристаллизации материала шва, в результате чего его параметры соответствуют параметрам свариваемых монокристаллов. Таким образом, получается полая моногранная трубка, которая в дальнейшем используется для производства катода термоэмиссионного преобразователя. Для повышения качества технологического процесса электронно-лучевой сварки многими авторами было проведено математическое моделирование данного технологического процесса в разных режимах и с разными материалами [3–7]. Для моделирования технологического процесса электронно-лучевой сварки используются как классические методы, основанные на уравнениях теплопроводности [8–10], так и интеллектуальные [11]. Современные методы управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке представлены в работах [12, 13]. К таким методам, в частности, относятся импульсная модуляция тока электронного луча, осцилляция луча с различного вида разверткой по стыку сварного соединения, многофокусная сварка.

### Структура и алгоритмы работы ПО

Программный продукт реализован в виде оконного приложения для операционных систем линейки Windows, совместимого с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Инструментом для реализации приложения выбран язык программирования C++, методологией разработки – объектно-ориентированный подход [14–16], средой разработки – C++ Builder XE от компании Embarcadero.

Для работы с COM-портами использовались средства WinApi [17, 18], для работы с платой сборки данных PCI1710 – сторонняя библиотека bdaqctrl.h [19].

Назначение программного продукта заключается в контроле основных параметров технологического процесса (ускоряющее напряжение, скорость сварки, ток электронного пучка, ток фокусировки, ток накала) и в программном задании значений таких параметров, как скорость сварки, ток пучка, время нарастания, время спада.

Структурная схема программного продукта представлена на рисунке 1.

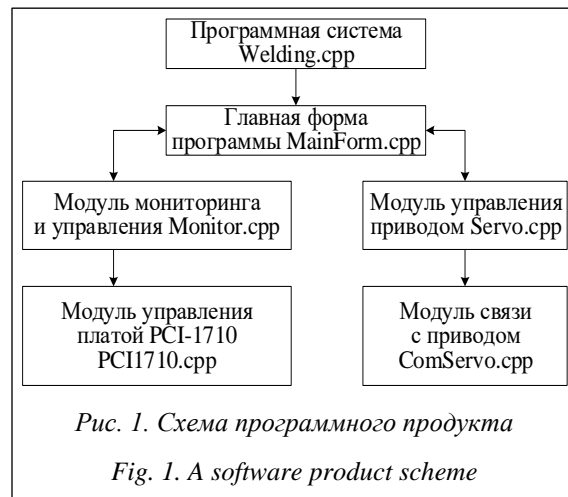


Рис. 1. Схема программного продукта

Fig. 1. A software product scheme

Как видно из рисунка, программная система включает в себя пять модулей:

- основной файл программной системы Welding.cpp реализует основную функцию системы, отвечающую за запуск, функционирование и завершение работы программной системы;

- главная форма MainForm.cpp реализует графический интерфейс пользователя программной системы для управления электронно-лучевой сваркой;

- модуль мониторинга и управления Monitor.cpp реализует алгоритмы управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки;

- модуль управления платой PCI1710 PCI1710.cpp предназначен для обработки данных со средств измерения и управления исполнительными механизмами установки электронно-лучевой сварки;

- модуль управления сервоприводом Servo.cpp и модуль связи с приводом ComServo.cpp предназначены для реализации взаимодействия системы с сервоприводом.

В программной системе реализованы три пользовательских класса: ICluste, Servo, Comport.

Класс ICluste реализует алгоритмы управления параметрами технологического процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения и позволяет:

- обеспечивать ввод электронного пучка по заданным параметрам времени ввода и порога уровня пучка;
- обеспечивать вывод пучка по заданным параметрам времени ввода и порога понижения уровня электронного пучка;
- обеспечивать стабилизацию тока пучка по параметру тока пучка и времени стабилизации;
- возвращать текущее измеренное значение тока пучка;
- устанавливать необходимое значение тока пучка;
- прерывать выполнение алгоритмов ввода, стабилизации или вывода пучка;
- обеспечивать переключение управления током пучка между ручным и автоматическим режимами.

Класс Servo реализует алгоритмы настройки и управления сервоприводом и позволяет:

- настраивать состояние портов контроллера сервопривода;
- возвращать текущее состояние портов контроллера сервопривода;
- возвращать логическое значение, указывающее на режим управления сервоприводом: ручной или автоматический;
- обеспечивать запуск или остановку сервопривода в зависимости от логического аргумента;
- получать значения текущей скорости вращения вала сервопривода и числа оборотов в минуту;
- обеспечивать сглаживание значений скорости, полученных контроллером сервопривода;
- переключать режим управления сервоприводом с ручного на автоматический и наоборот;
- возвращать текущее значение режима работы сервопривода.

Класс Comport реализует методы взаимодействия системы и контроллера сервопривода по COM-порту.

На рисунке 2 представлена блок-схема работы программной системы. На начальном

этапе после запуска программы происходит открытие COM-порта, который используется для обмена данными с приводом. Далее производятся инициализация платы PCI-1710 и ее конфигурирование под программную систему.

После успешной конфигурации платы происходит обмен данными с оборудованием с целью сброса уставок токов луча и фокусировки. Далее происходит обращение в память с целью загрузки последних сохраненных параметров технологического процесса из советуемого файла.

В случае неудачи будут установлены стандартные параметры процесса. По окончании всех начальных операций инициализации на экран выводится форма, которая предоставляет оператору графический интерфейс для работы с системой. Оператор может начать или прекратить процесс мониторинга за технологическими параметрами процесса, данная операция сбрасывает уставки в аппаратных блоках.

Установка параметров, которые будут использованы после запуска сварки, производится путем предварительного задания их оператором с помощью внешних органов управления системой с последующим нажатием кнопки «Принять параметры».

Момент исполнения алгоритма управления током пучка наступает после запуска процесса сварки. Блок-схема алгоритма управления током пучка представлена на рисунке 3.

Как видно из блок-схемы, на первоначальном этапе производится считывание заданных оператором параметров сварки. Кроме того, используются предварительные установки, не показанные в данной блок-схеме и определяемые ранее в отдельной форме программы.

Далее вызывается подпрограмма проверки готовности системы к работе. По ее результатам либо, если проверка не пройдена, выводится служебное сообщение об ошибочном задании параметров, их нехватке или о неисправности какого-либо элемента системы, предоставляя информацию оператору о характере сбоя, который необходимо устранить, либо, если проверка успешна, управление передается следующему участку программы.

После успешной проверки вызываются подпрограммы управления приводом и током накала пушки, которые исполняются как отдельные алгоритмы. После инициализации их работы вызывается подпрограмма ввода тока электронного пучка. Эта подпрограмма использует уставки времени ввода и необходимого значения тока пучка. Она исполняется до

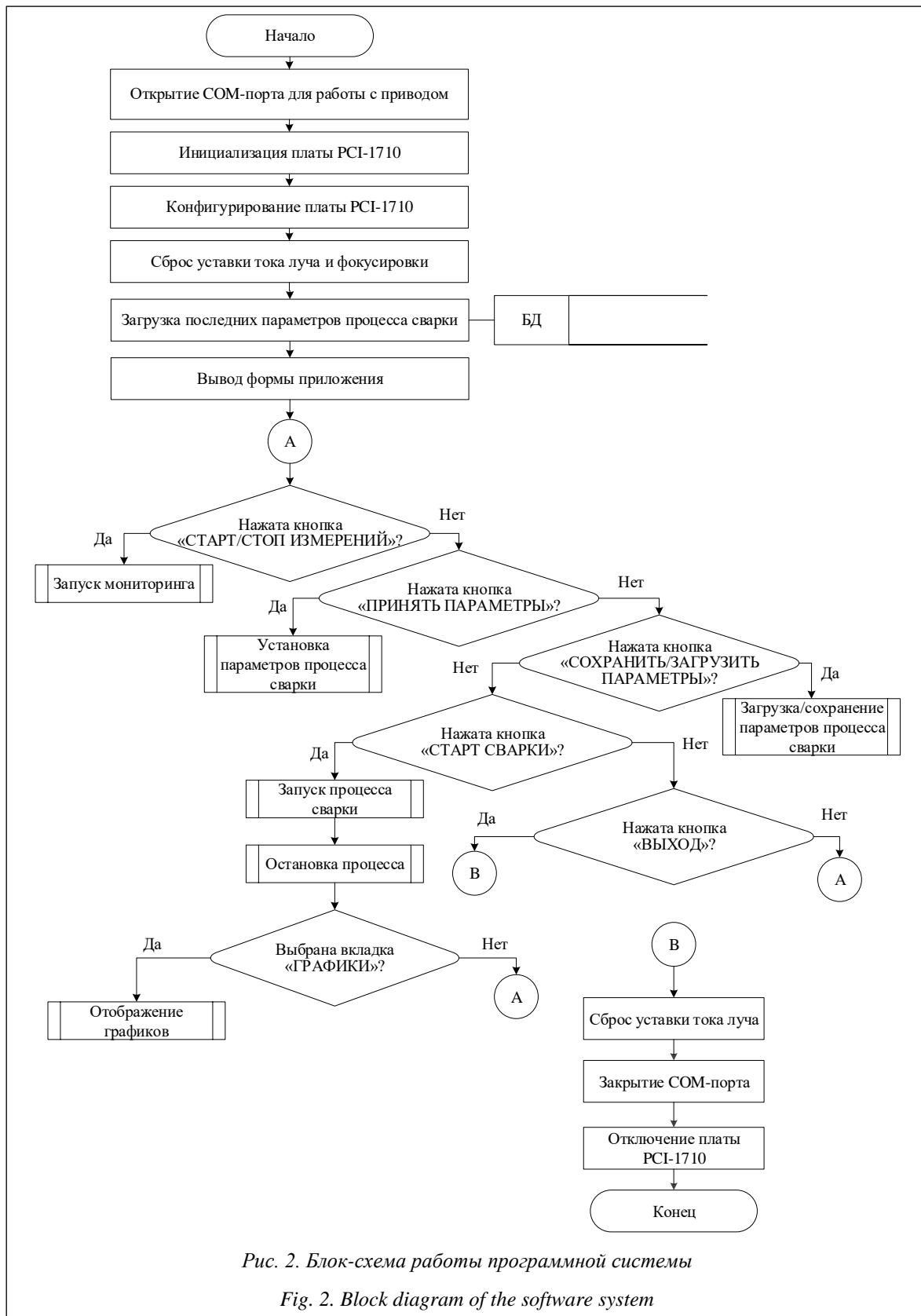


Рис. 2. Блок-схема работы программной системы

Fig. 2. Block diagram of the software system

достижения заданного уровня тока, передавая управление в другие блоки управления после

очередного цикла управления. По выполнении условия завершения ввода пучка система пере-

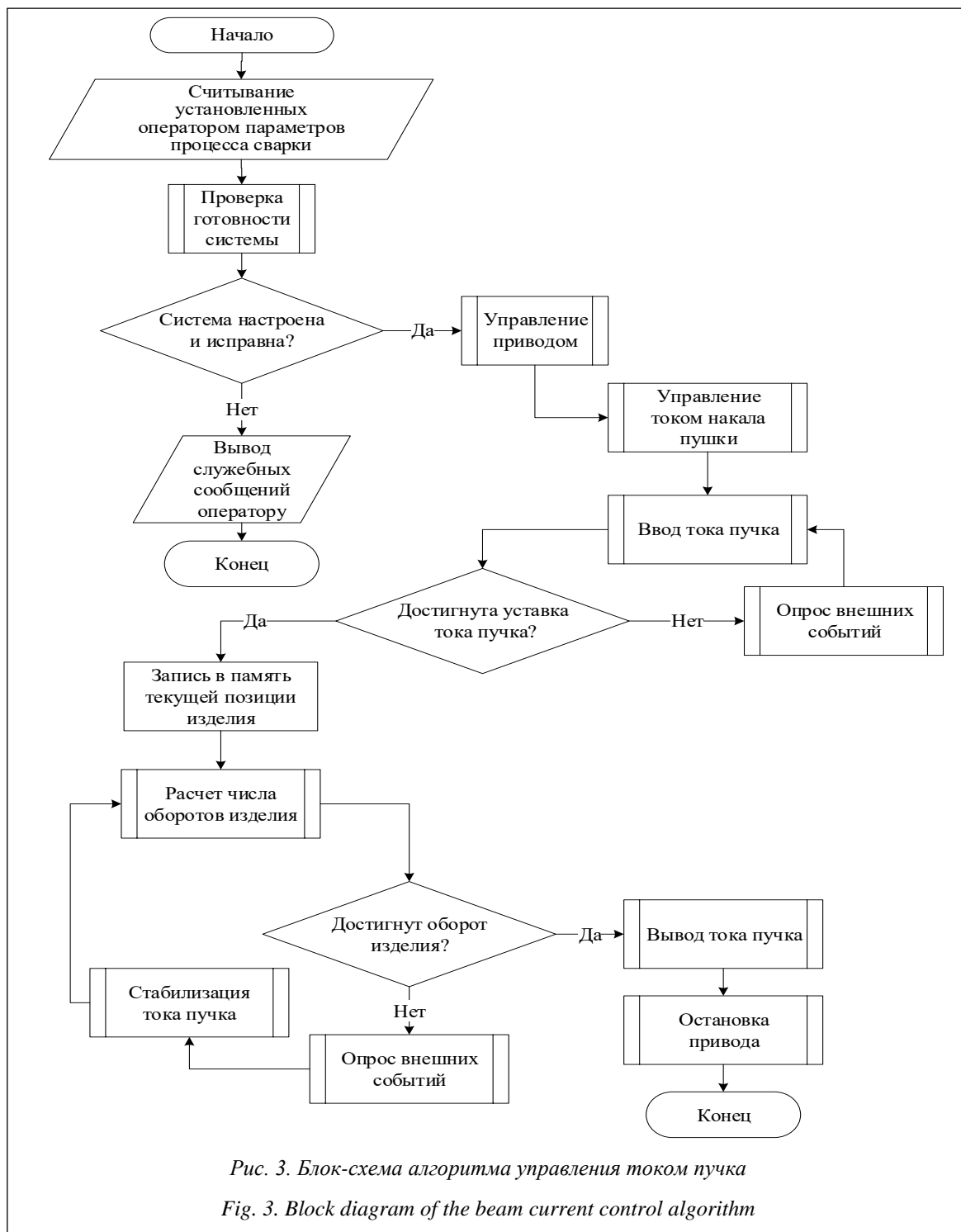


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления током пучка

Fig. 3. Block diagram of the beam current control algorithm

ходит в режим его стабилизации на заданном уровне, а также отсчета оборота свариваемого изделия. Текущее положение изделия записывается в память, затем вызывается подпрограмма расчета числа оборотов, после которой производится проверка условия перехода в режим вывода пучка. Если оборот изделия не достигнут, управление передается внешним под-

программам, далее вызывается подпрограмма стабилизации пучка. Так повторяется до достижения условия окончания режима стабилизации пучка. После достижения одного оборота изделия вызывается подпрограмма, обеспечивающая режим вывода пучка по заданному параметру времени спада. После вывода электронного пучка инициализируются остановка

привода и завершение работы алгоритма.

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма ввода/вывода электронного луча.

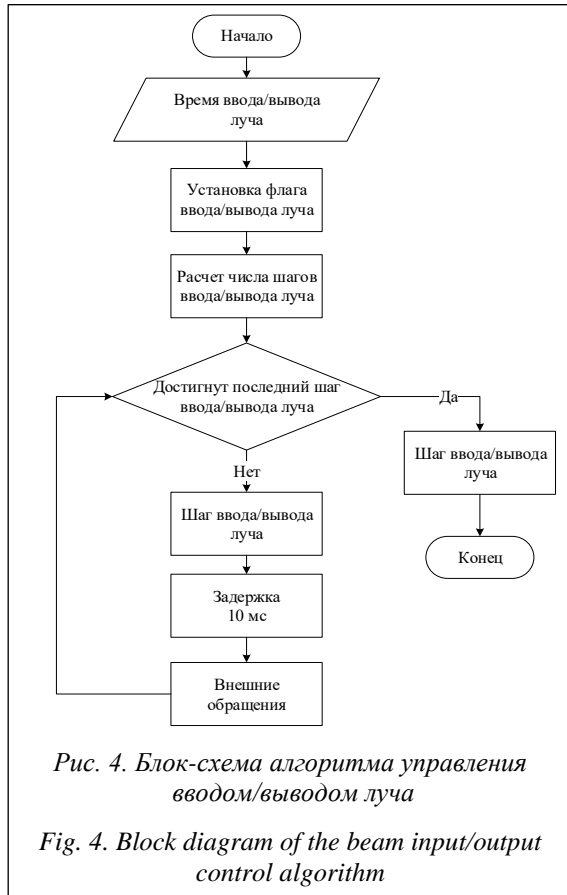


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления вводом/выводом луча

Fig. 4. Block diagram of the beam input/output control algorithm

В качестве входных данных для алгоритма используется время ввода/вывода, на его основе определяется количество шагов, необходимых для выполнения операций. Каждому шагу ввода и вывода сопоставляется свое значение уставки. Выставляются соответствующие флаги состояния процесса.

Далее происходит оценка текущего шага процесса и на его основе определяется окончание процесса. Если процесс продолжается, делается очередной шаг ввода или вывода, происходит задержка в 10 мс, управление передается внешним алгоритмам. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут шаг, указывающий на окончание процесса ввода или вывода луча. Далее происходит сброс флагов и выход из алгоритма.

### Описание работы с программной системой

Запуск программы осуществляется посредством исполнения файла Welding.exe. На ри-

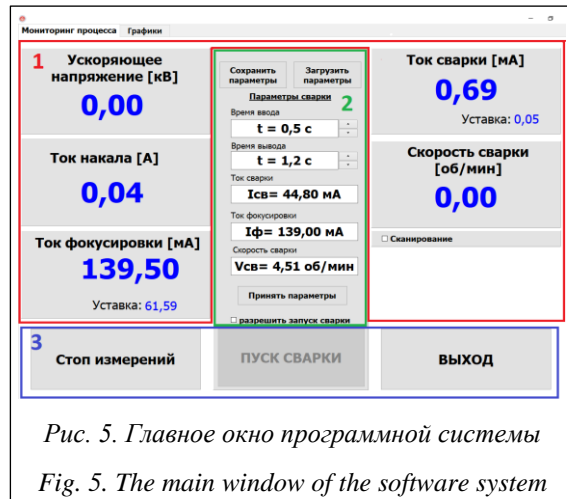


Рис. 5. Главное окно программной системы

Fig. 5. The main window of the software system

сунке 5 представлен внешний вид программы, соответствующий состоянию после запуска. Элементы окна программы разделены на три группы.

Группу 1 составляют элементы, отображающие текущие параметры процесса сварки: ускоряющее напряжение, ток накала, скорость сварки, ток сварки, ток фокусировки.

Группа 2 содержит информацию о параметрах, которые будут использованы при запуске процесса сварки, и элементы управления, позволяющие их изменить.

В группу 3 входят управляющие кнопки «Старт/стоп измерений», «Пуск/стоп сварки», «Выход».

При нажатии кнопки «Старт измерений» происходит сброс уставок в аппаратных блоках управления током пучка и током фокусировки, соответственно, повторное нажатие на данную кнопку, но уже с названием «Стоп измерений», останавливает слежение за состоянием процесса.

Перед закрытием (кнопка «Выход») производится сброс уставок в аппаратных блоках управления током пучка и током фокусировки.

С помощью внешнего задания оператором выставляются параметры технологического процесса («Принять параметры»), после чего происходит изменение уставок, которые будут использованы после запуска сварки. Время ввода и вывода электронного луча задается оператором вручную путем нажатия управляющих кнопок, находящихся в непосредственной близости от поля отображения данных параметров с шагом 0,1 с.

Текущие уставки процесса сварки с указанием текущей даты и времени записываются в файл (кнопка «Сохранить»), при этом создается дополнительный файл, из которого будут

загружены параметры процесса при следующем запуске программы. При нажатии кнопки «Загрузить» откроется окно, позволяющее выбрать один из ранее сформированных файлов с параметрами процесса сварки. После установки пункта «Разрешить запуск сварки» оператору предоставляется возможность запуска сварки.

Вкладка «Графики» (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/13.jpg>) позволяет просматривать параметры процесса в графическом виде как на этапе ручного управления процессом, так и после запуска в автоматическом режиме.

В последнем случае отслеживание процесса начинается непосредственно после его запуска и до окончания.

Эффективность автоматизированной системы была проверена в рамках стендовых испытаний. Результаты испытаний показали, что эффективность автоматизированной системы

управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения полностью удовлетворяет заявленным требованиям.

### Заключение

В данной работе представлена разработка системы автоматизации электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения. Программное решение содержит функционал настройки основных параметров технологического процесса электронно-лучевой сварки, кроме того, возможен просмотр графиков данных параметров технологического процесса.

Апробация предложенного решения проводилась в рамках стендовых испытаний, показавших высокое качество управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки тонокостенных конструкций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-48-240007.*

### Литература

1. Шаронов Н.И. Применение электронно-лучевой сварки в турбостроении // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2010. № 3. С. 143–149.
2. Ластовирия В.Н., Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Использование электронно-лучевой сварки для создания термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) из монокристаллов вольфрама // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 3. С. 27–35.
3. Младенов Г.М., Колева Е.Г., Бельский В.Я., Трушников Д.Н. Моделирование и оптимизация электронно-лучевой сварки сталей // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 4. С. 7–21.
4. Бельский В.Я., Трушников Д.Н., Пискунов А.Л., Лялин А.Н. Динамическая модель электронно-лучевой сварки со сквозным проплавлением // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13. № 3. С. 72–84.
5. Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Цаплин А.И., Бельский В.А., Младенов Г.М. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка // Изв. ТулГУ. Технич. науки. 2015. № 6. С. 124–133.
6. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М., Колева Е.Г. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 3. С. 49–74.
7. Пермяков Г.Л., Ольшанская Т.В., Бельский В.Я., Трушников Д.Н. Моделирование электронно-лучевой сварки для определения параметров сварных соединений разнородных материалов // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 4. С. 48–58.
8. Denlinger E.R. Thermo-mechanical modeling of large electron beam builds. Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing. Butterworth-Heinemann Publ., 2018, pp. 167–181.
9. Raj R.A., Anand M.D. Modeling and prediction of mechanical strength in electron beam welded dissimilar metal joints of stainless steel 304 and copper using grey relation analysis. Engineering & Technology, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 198–201.
10. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.
11. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G., Pal A.R. Phenomenological model-based study on electron beam welding process, and input-output modeling using neural networks trained by back-propagation algorithm,

genetic algorithms, particle swarm optimization algorithm and bat algorithm. Applied Intelligence, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 2698–2718.

12. Tadano S., Hino T., Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powder-bed electron beam melting for Ni superalloy. J. of Materials Processing Technology, 2018, vol. 257, pp. 163–169.

13. Das D., Pratihar D.K., Roy G.G. Cooling rate predictions and its correlation with grain characteristics during electron beam welding of stainless steel. The International J. of Advanced Manufacturing Technology, 2018, vol. 97, no. 5–8, pp. 2241–2254. DOI: 10.1007/s00170-018-2095-6.

14. Stroustrup B. The C++ programming language. Pearson Education Publ., 2000, 1040 p.

15. Dattatri K., Foreword By-Gamma E. C++: effective object-oriented software construction. Prentice Hall PTR, 1999, 755 p.

16. Balagurusamy E. Object Oriented Programming with C++. Tata McGraw-Hill Education, 2001, 533 p.

17. Магда Ю.С. Программирование последовательных интерфейсов. СПб, 2009. 304 с.

18. Жмудь В.А., Трубин М.В., Трубин И.В. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232 // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1. С. 45–51.

19. Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Лаптенко В.Д., Серегин Ю.Н., Злобин С.К. Программное обеспечение технологического процесса пайки волноводных трактов космических аппаратов // Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 128–134.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327

Received 21.10.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 319–327

### Software for an automated control system for electron beam welding of thin-walled structures

V.S. Tynchenko <sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vadimond@mail.ru

V.E. Petrenko <sup>1</sup>, Postgraduate Student, dpblra@inbox.ru

A.V. Milov <sup>1</sup>, Postgraduate Student, antnraven@ieee.org

<sup>1</sup>Academician M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Information-Control Systems Chair, Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

**Abstract.** The paper proposes a solution to the automated control problem of the technological process for electron beam welding of components and spacecraft parts. There is a specific analysis of the electron beam welding process, which makes it obvious that it needs to be automated using a software system.

Using the developed automated system allows to increase the problem accurately and the main technological parameters reproducibility of the electron beam welding process, such as beam current, glow, beam focusing, welding speed. The software product is an application for the Windows operating system that is compatible with versions of Windows XP/7/8/8.1/10.

The application was by using the high-level programming language C++ and the integrated development environment Embarcadero RAD Studio XE7. Development was with using an object-oriented approach.

The paper shows the software control system structure, its operation algorithm in the block diagram form, as well as a screen form diagram. The software solution presented in the framework of this paper contains the functionality for setting such parameters of the electron beam welding process as the welding speed, start current, rise time, and fall time. The software also solves the controlling parameter problems such as accelerating voltage, welding speed, beam current, focusing current, and glow current. The target process parameters are manually set by the user, and the process control is in software. In addition, it is possible to view the process parameter data graphs. Solution testing was as part of a bench test series, which results showed a fairly high-quality control of the electron beam welding technological process.

**Keywords:** automated system, automated control, spacecraft parts, electron beam welding, software product, beam focusing.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR, Government of the Krasnoyarsk Territory and the Regional Science Foundation, project no. 19-48-240007.



### References

1. Sharonov N.I. Electron beam welding in turbine construction. *St. Petersburg Polytech. Univ. J. of Eng. Sci. and Tech.*, 2010, no. 3, pp. 143–149 (in Russ.).
2. Lastovirya V.N., Novokreshchenov V.V., Rodyakina R.V. Using of electron beam welding to create thermionic converters from tungsten monocrystals. *Global Nuclear Safety*, 2015, no. 3, pp. 27–35 (in Russ.).
3. Mladenov G.M., Koleva E.G., Belenky V.Ya., Trushnikov D.N. Modeling and optimization of electron beam steel welding. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 7–21 (in Russ.).
4. Belenky V.Ya., Trushnikov D.N., Piskunov A.L., Lyalin A.N. The dynamic model of electron beam welding with through penetration. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 72–84 (in Russ.).
5. Salomatova E.S., Trushnikov D.N., Tsaplin A.I., Belenky V.Ya., Mladenov G.M. Simulation of evaporation processes at “multi-keyhole” technology in electron beam welding. *Bull. TulSU. Tech. Sci.*, 2015, no. 6, pp. 124–133 (in Russ.).
6. Olshanskaya T.V., Fedoseeva E.M., Koleva E.G. Construction of thermal models in electron beam welding using Green's function method. *Bull. PNRPU*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 49–74 (in Russ.).
7. Permyakov G.L., Ol'shanskaya T.V., Belenky V.Ya., Trushnikov D.N. Electron beam welding simulation for determining the parameters of welded joints of dissimilar materials. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 48–58. (in Russ.).
8. Denlinger E.R. *Thermo-Mechanical Modeling of Large Electron Beam Builds. Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*. Butterworth-Heinemann Publ., 2018, pp. 167–181.
9. Raj R.A., Anand M.D. Modeling and prediction of mechanical strength in electron beam welded dissimilar metal joints of stainless steel 304 and copper using grey relation analysis. *Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 198–201.
10. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.
11. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G., Pal A.R. Phenomenological model-based study on electron beam welding process, and input-output modeling using neural networks trained by back-propagation algorithm, genetic algorithms, particle swarm optimization algorithm and bat algorithm. *Applied Intelligence*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 2698–2718.
12. Tadano S., Hino T., Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powder-bed electron beam melting for Ni superalloy. *J. of Materials Processing Technology*, 2018, no. 257, pp. 163–169.
13. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G. Cooling rate predictions and its correlation with grain characteristics during electron beam welding of stainless steel. *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 5–8, pp. 2241–2254. DOI: 10.1007/s00170-018-2095-6.
14. Stroustrup B. *The C++ Programming Language*. Pearson Education Publ., 2000, 1040 p.
15. Dattatri K. *Foreword By-Gamma E. C++: Effective Object-Oriented Software Construction*. Prentice Hall PTR, 1999, 755 p.
16. Balagurusamy E. *Object Oriented Programming with C++*. Tata McGraw-Hill Education, 2001.
17. Magda Yu.S. *Serial Programming*. St. Petersburg, 2009, 304 p. (in Russ.).
18. Zhmud' V.A., Trubin M.V., Trubin I.V. Data exchange between the computer and the stm32f100 microcontroller via the RS-232 serial communication interface. *Automatics & Software Engineering*, 2015, no. 1, pp. 45–51 (in Russ.).
19. Tynchenko V.S., Bocharov A.N., Laptinok V.D., Seregin Yu.N., Zlobin S.K. The software of technological process of soldering spacecrafts' waveguides. *Software & Systems*, 2016, no. 2, pp. 128–134 (in Russ.).

### Для цитирования

Тынченко В.С., Петренко В.Е., Милов А.В. Программное обеспечение автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 319–327. DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327.

### For citation

Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Milov A.V. Software for an automated control system for electron beam welding of thin-walled structures. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 319–327 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327.

УДК 621.311  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.328-335

Дата подачи статьи: 04.02.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 328–335

## **О программном обеспечении для планирования мероприятий по снижению потерь мощности от несимметрии токов в сетях 0,4 кВ**

А.Б. Баламетов<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, [balametov.azniie@gmail.com](mailto:balametov.azniie@gmail.com)  
А.К. Салимова<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, ученый секретарь, [afag\\_sk@mail.ru](mailto:afag_sk@mail.ru)  
Н.И. Гаджиев<sup>2</sup>, проректор, старший преподаватель кафедры электромеханики, [naib.haciyev.sdu@mail.ru](mailto:naib.haciyev.sdu@mail.ru)  
Э.А. Баламетов<sup>3</sup>, к.т.н., старший диспетчер

<sup>1</sup> Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, г. Баку, Аз1012, Азербайджан

<sup>2</sup> Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, AZ5008, Азербайджан

<sup>3</sup> ООО «Азершшыг», г. Баку, AZ1008, Азербайджан

Рост мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузки ухудшает показатели качества электрической энергии в системах электроснабжения. В результате электрооборудование, рассчитанное на работу в электрической системе при определенном уровне характеристик электрической энергии, эксплуатируется в неэффективных режимах. Это приводит к снижению эффективности работы как самих систем электроснабжения, так и потребителей, подключенных к ним. В результате растет интерес к расчетам потерь мощности от несимметрии токов и напряжений в электрических сетях 0,4 кВ и к соответствующему ПО для оценки потерь мощности от несимметрии токов и напряжений в электрических сетях.

Для определения показателей качества электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ проводились измерения с помощью прибора SIMEAS Q. Напряжение в фазах несимметрично и меняется в пределах 211–228 В, в то же время в конце фидера напряжение меняется в пределах от 145 до 228 В. Изменение активной мощности на головном участке фидера за сутки составляет 2–7 кВт, в фазах нагрузки варьируется в пределах 15–50 % от полной нагрузки, изменение реактивной мощности по фазам находится в пределах 0,8–1,6 кВАр. У потребителей с нелинейным и несимметричным характером нагрузки, отдаленных от центра питания, уровни напряжения в течение 30 % времени дня меньше нормы.

Авторы разработали программу для расчета несимметричных режимов и потерь мощности для четырехпроводных электрических сетей 0,38 кВ режимов с нулевым проводом. Проведен расчет потерь мощности для несимметричных режимов четырехпроводной электрической сети с нулевым проводом.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, электрические сети 0,4 кВ, качество электроэнергии, несимметричная нагрузка, несимметрия токов, измерения, показатели качества электроэнергии, потери мощности.

Увеличение количества и установленной мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузки на транспорте и в быту, а также развитие технологических установок в промышленности приводят к ухудшению качества электрической энергии (ЭЭ) в системах электроснабжения. В результате снижается эффективность работы как самих систем электроснабжения, так и потребителей, подключенных к ним. Как следствие – электрооборудование, рассчитанное на работу в электрической системе при определенном уровне характеристик ЭЭ, во многих случаях эксплуатируется в неэффективных режимах, что приводит к отрицательным последствиям: увеличение потерь в элементах системы, со-

кращение срока службы электрооборудования, ложные срабатывания релейной защиты и автоматики, сбои в работе электронных устройств управления и вычислительной техники, помехи в линиях связи, нарушение нормальной работы производства [1–4].

Несимметрия токов и напряжений влечет за собой увеличение потерь ЭЭ в сетях и элементах ее распределения.

Ущерб от снижения качества ЭЭ обусловлен ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования, увеличением потерь активной мощности и потребления активной и реактивной мощностей.

В сетях промышленных предприятий имеет место значительное количество несимметрич-

ных и нелинейных нагрузок, чувствительных к искажениям напряжений. При снижении качества напряжения ухудшаются условия работы электрооборудования, что приводит к увеличению потерь активной мощности.

На современном этапе развития энергетики достаточно остро стоит вопрос перехода к энергосберегающим технологиям. Это вызвано возрастающим электропотреблением и снижением качества ЭЭ для развивающихся сельскохозяйственных потребителей.

Целью данной работы является анализ путей снижения потерь и повышения качества ЭЭ.

Особенность электрических сетей сельскохозяйственного назначения заключается в большой рассредоточенности потребителей ЭЭ, значительной протяженности сетей 10(6) и 0,4 кВ, в малых величинах потребления в каждом узле [5–8].

В распределительных электрических сетях несимметричной нагрузки с коммунально-бытовыми нагрузками (КБН) применяются трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем», обладающие большим сопротивлением нулевой последовательности, примерно на порядок превышающим сопротивление прямой последовательности. При несимметричной нагрузке фаз в этих трансформаторах возникает значительное напряжение нулевой последовательности, вызывающее несимметрию напряжений во вторичных обмотках трансформатора. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности трансформаторов часто превышает допустимое ГОСТ 13109–97 значение [1, 2].

Данная работа посвящена исследованиям показателей качества ЭЭ (ПКЭ) в сетях 0,4 кВ с КБН. Для измерения ПКЭ в узлах низкого напряжения трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ использовались приборы SIMEAS Q.

### Результаты экспериментальных исследований ПКЭ в распределительной электрической сети 0,4 кВ

Для определения ПКЭ в электрических сетях 0,4 кВ проводились измерения и испытания на стороне 0,4 кВ трансформаторного пункта. Измерения осуществлялись в летнее время на головной части трехфазного фидера и в точке соединения самого удаленного однофазного абонента с помощью прибора SIMEAS Q. Результаты проведенных исследований показали необходимость перехода на новую энергосбе-

регающую систему электроснабжения, позволяющую повысить показатели качества ЭЭ.

Графики результатов измерений качества ЭЭ представлены на рисунках 1 и 2.

Графические изменения напряжений в фазах в головном участке фидера показывают, что напряжение летом находится на уровне 210–228 В (рис. 2), то есть на нормальном уровне.

Напряжение в фазах несимметрично и меняется в пределах 211–228 В, то есть 17 В за 18 часов. В то же время на конце фидера напряжение меняется в пределах от 145 до 228 В.

Изменение активной мощности в головном участке фидера за сутки составляет 2–7 кВт.

Результаты экспериментов показывают, что в фазах нагрузка варьируется в пределах

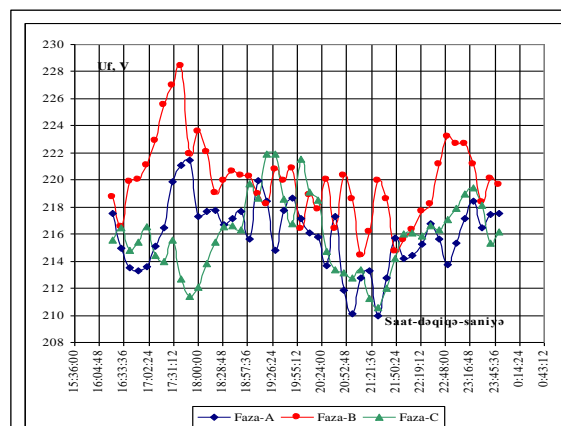


Рис. 1. Графики изменения напряжения в головном участке фидера 0,4 кВ

Fig. 1. The voltage change graphs in the head section of the feeder 0,4 kV

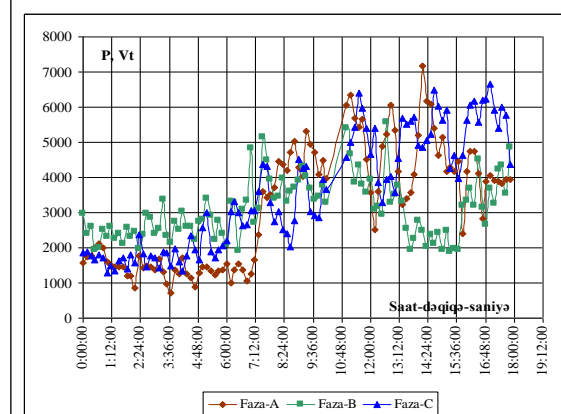


Рис. 2. Графики изменения активной мощности фазы активной мощности в головном участке

Fig. 2. The active power change graphs in the head section phase

15, 35 и 50 % от трехфазной полной нагрузки. В головном участке фидера изменение реактивной мощности по фазам лежит в пределах 0,8–1,6 кВАр.

У потребителей несимметричной нагрузки, отдаленных от центра питания на 600–950 м, уровень напряжения в течение 40 % времени суток составляет 5 %, для 25 % времени за сутки в норме и в течение 30 % времени дня меньше нормы.

Результаты измерений показали, что токи в отдельных фазах фидеров существенно различаются и изменяются в течение суток, то есть режимы работы сетей несимметричны. Коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям составляют 20–25 %. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности в часы вечернего максимума нагрузок достигает 7,3 %, что существенно превышает допустимое значение.

При коэффициентах несимметрии токов обратной и нулевой последовательности в сети, равных 0,25–0,30, потери мощности и ЭЭ в линиях и трансформаторах возрастают на 30–50 % по сравнению с симметричным режимом работы [6–9].

Технологические потери ЭЭ в сельских сетях за последнее десятилетие выросли почти в 3 раза и достигают 30 % [9, 10]. Причиной этого является рост в сетях 0,4 кВ доли однофазной нагрузки по сравнению с трехфазной симметричной нагрузкой. Этому способствовало, в частности, применение мощных (до 50 кВт и выше) однофазных стабилизаторов напряжения.

Существенного снижения потерь ЭЭ в сетях 0,4 кВ можно добиться за счет уменьшения несимметрии токов в этих сетях.

При несимметричной системе токов на участке сети потери мощности  $\Delta P_{ns}$  складываются из потерь, обусловленных токами прямой  $I_1$ , обратной  $I_2$  и нулевой  $I_0$  последовательностей [9, 10]:

$$\Delta P_{ns} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 + 3I_0^2 R_0, \quad (1)$$

где  $R_1, R_2, R_0$  – активное сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей участка сети соответственно.

Для расчета потерь мощности на участке сети определим коэффициент потерь мощности от несимметрии токов  $K_{ns}$  как отношение потерь мощности при несимметричном режиме работы сети  $\Delta P_{ns}$  к потерям мощности при симметричном режиме, обусловленных токами прямой последовательности:

$$K_{ns} = \frac{\Delta P_{ns}}{\Delta P_1} = 1 + \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1} + \frac{I_0^2 R_0}{I_1^2 R_1} = 1 - K_{2i}^2 \frac{R_2}{R_1} + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}, \quad (2)$$

где  $K_{2i} = \frac{I_2}{I_1}, K_{0i} = \frac{I_0}{I_1}$  – коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов.

Для трансформаторов и линий электропередачи имеет место  $R_2 = R_1$ . В таком случае выражение (2) запишется в следующем виде:

$$K_{ns} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}. \quad (3)$$

Для трехфазной линии с нулевым проводом  $R_0 = R_\phi + 3R_N$ , поэтому

$$K_{ns0} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \left( 1 + \frac{3R_N}{R_\phi} \right), \quad (4)$$

где  $R_\phi, R_N$  – активное сопротивление фазного и нулевого проводов.

Из выражения (3) видно, что коэффициент потерь мощности от несимметрии токов зависит от коэффициентов несимметрии токов обратной и нулевой последовательностей и от отношения активных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей.

Потери ЭЭ в линии напряжением 0,4 кВ обычно в соответствии с ГОСТ 13109–97 определяют по формуле

$$\Delta W_N = 0,7 K_{нер} \Delta U_1 \frac{\tau}{T_{\max}}, \quad (5)$$

где  $\Delta U_1$  – потери напряжения в максимум нагрузки сети от шин трансформаторного пункта до наиболее удаленного электроприемника, %;  $K_{нер}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузок по фазам.

Коэффициент  $K_{нер}$  определяют по формуле

$$K_{нер} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \left( 1 + 1,5 \frac{R_N}{R_\phi} \right) - 1,5 \frac{R_N}{R_\phi}, \quad (6)$$

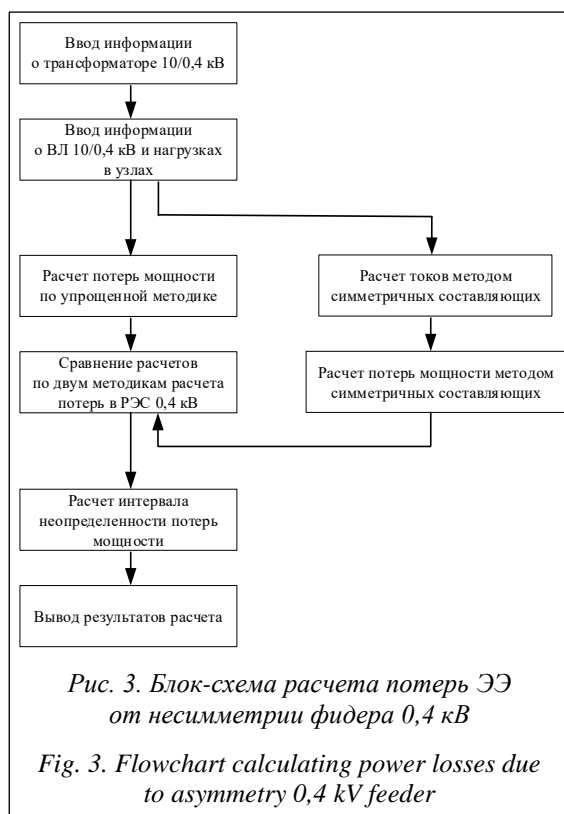
где  $I_A, I_B, I_C$  – измеренные токовые нагрузки фаз;  $R_N/R_\phi$  – отношение сопротивлений нулевого и фазного проводов.

При отсутствии данных о токовых нагрузках для линий с  $R_N/R_\phi = 1$  следует принимать  $K_{нер} = 1,13$ , для линий с  $R_N/R_\phi = 2$  –  $K_{нер} = 1,2$ .

### Расчет несимметричных режимов четырехпроводной электрической сети с нулевым проводом

Разработана программа в среде DELPHI для расчета несимметричных режимов и потерь

мощности для четырехпроводных электрических сетей 0,38 кВ режимов с нулевым проводом [11], блок-схема которой приведена на рисунке 3.



Известны методы расчета показателей несимметрии токов и напряжений и коэффициента потерь мощности от несимметрии токов [10, 11]. В этой программе в качестве критерия потерь применен коэффициент потерь мощности от несимметрии токов. Программа включает следующие этапы:

- расчет потерь мощности в каждой линии и в трансформаторе при симметричной нагрузке;

- расчет потерь мощности, обусловленных несимметрией токов на каждом участке линий и в трансформаторе;

- расчет потерь ЭЭ при несимметричной системе токов в каждой линии, отходящей от данного трансформатора, и в трансформаторе.

Отличительной особенностью программы является ее комплексный характер: одновременно с расчетом потерь ЭЭ в узле сети 0,4 кВ рассчитываются показатели несимметрии напряжений и токов во всех линиях, отходящих от данного трансформатора.

Для моделирования токов методом симметричных составляющих использована стандартная программа [12] (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/1.jpg>).

**Пример 1.** Расчет для схемы «трансформатор–воздушная линия». Сечение линии 0,38 кВ составляет 25 мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление – 1,2 Ом/км, длина – 0,2 км. Сечение нулевого провода – 35 мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление – 0,87 Ом/км. Потери холостого хода трансформатора –135 Вт.

Расчеты были проведены для несимметричных одно-, двух- и трехфазных нерегулярных режимов нагрузки электрической цепи (рис. 4).

Сопротивления трансформатора 25 кВА приведены к напряжению 0,4 кВ (табл. 1).

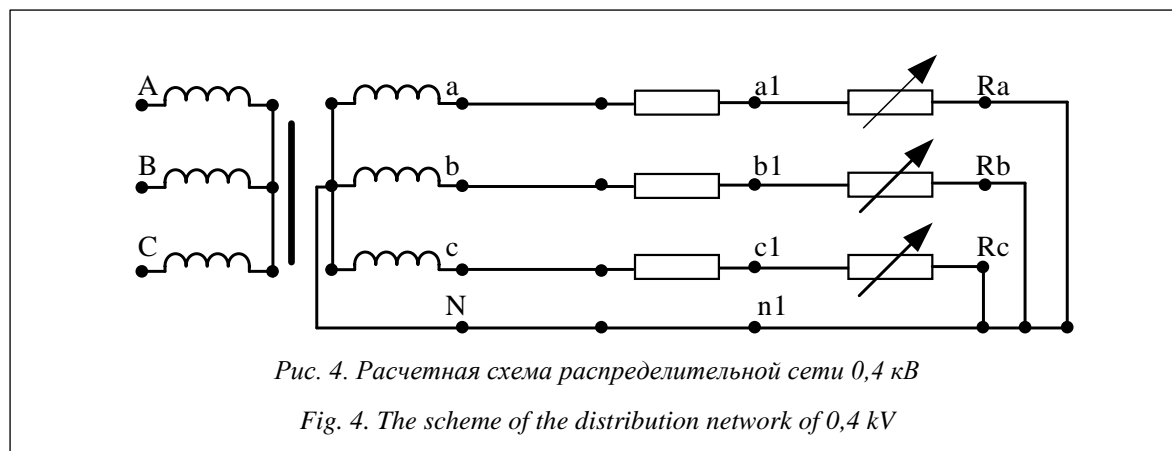
Таблица 1

Сопротивления элементов сети, Ом

Table 1

Network element resistance, Ом

| Элемент сети                   | Параметр  |       |       |       |       |        |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                | $u_k, \%$ | $r_1$ | $x_1$ | $z_1$ | $r_0$ | $x_0$  |
| Трансформатор Y/Y <sub>0</sub> | 4,5       | 0,154 | 0,244 | 0,287 | 1,650 | 1,930  |
| Трансформатор Y/Z <sub>0</sub> | 4,7       | 0,177 | 0,243 | 0,302 | 0,073 | 0,0354 |
| Линия                          | -         | 0,24  | 0,077 | 0,252 | 0,762 | 0,308  |



Сопrotивление симметричной нагрузки дано как  $Z_A = Z_B = Z_C = 7 + j3$  Ом. В несимметричном режиме нагрузка на фазу А в  $Z_A = 7 + j3$  Ом, в других фазах В и С не имеется.

Результаты определения коэффициента потерь мощности от несимметрии токов по несимметричным однофазным режимам нагрузки трансформаторов  $Y/Y_0$  и  $Y/Z_0$  сведены в таблицы 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

**Результаты расчета в несимметричном режиме**

**Calculation results in asymmetric mode**

Table 2

| №  | Элемент сети          | Параметр            | Единица измерения | Однофазный несимметричный режим |
|----|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1  | Трансформатор ЛЭП     | $Z_a$               | Ом                | $Z_y = 7 + j3$                  |
| 2  |                       | $Z_b$               | Ом                | 0                               |
| 3  |                       | $Z_c$               | Ом                | 0                               |
| 4  |                       | $I_A$               | А                 | 25,82                           |
| 5  |                       | $I_B$               | А                 | 0                               |
| 6  |                       | $I_C$               | А                 | 0                               |
| 7  |                       | $I_1$               | А                 | 9,42                            |
| 8  |                       | $I_2$               | А                 | 9,42                            |
| 9  |                       | $I_0$               | А                 | 9,42                            |
| 10 |                       | $K_2$               | о.е.              | 1                               |
| 11 |                       | $K_0$               | о.е.              | 1                               |
| 12 | Трансформатор $Y/Z_0$ | $\Delta P_1$        | Вт                | 61,21                           |
| 13 |                       | $\Delta P_2$        | Вт                | 61,21                           |
| 14 |                       | $\Delta P_0$        | Вт                | 20,23                           |
| 15 |                       | $\Delta P_\epsilon$ | Вт                | 81,44                           |
| 16 |                       | $K_\epsilon$        | о.е.              | 1,33                            |
| 17 | ЛЭП 0,38 кВ           | $\Delta P_1$        | Вт                | 63,88                           |
| 18 |                       | $\Delta P_2$        | Вт                | 63,88                           |
| 19 |                       | $\Delta P_0$        | Вт                | 202,80                          |
| 20 |                       | $\Delta P_\epsilon$ | Вт                | 266,68                          |
| 21 |                       | $K_\epsilon$        | о.е.              | 4.175                           |

В таблице 3 приведены результаты однофазных несимметричных режимов с трансформатором со схемой соединения  $Y/Z_0$ .

В таблице 4 дается сравнительный анализ результатов расчетов несимметричных режимов.

Результаты исследования показывают, что потери в трансформаторах со схемой соединений  $Y/Z_0$  меньше, чем в обычных распределительных сетях  $Y/Y_0$ : при однофазной несимметричной нагрузке в 11 раз, при двухфазной несимметричной нагрузке в 8 раз.

**Пример 2.** Расчет для схемы «4-проводная воздушная линия». Сечение линии 0,38 кВ составляет 25 мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление –

1,2 Ом/км, длина – 0,2 км. Сечение нулевого провода – 35 мм<sup>2</sup>.

Результаты расчета по программе в среде DELPHI [11] по упрощенной методике в виде экранной формы приведены на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/2.jpg>).

Таблица 3

**Результаты расчета несимметричных режимов с трансформатором  $Y/Z_0$**

Table 3

**The calculation results for unbalanced modes with a transformer  $Y/Z_0$**

| №  | Элемент сети          | Параметр            | Единица измерения | Однофазный несимметричный режим |
|----|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1  | Трансформатор ЛЭП     | $Z_a$               | Ом                | $Z_y = 7 + j3$                  |
| 2  |                       | $Z_b$               | Ом                | 0                               |
| 3  |                       | $Z_c$               | Ом                | 0                               |
| 4  |                       | $I_A$               | А                 | 20,23                           |
| 5  |                       | $I_B$               | А                 | 0                               |
| 6  |                       | $I_C$               | А                 | 0                               |
| 7  |                       | $I_1$               | А                 | 9,45                            |
| 8  |                       | $I_2$               | А                 | 9,45                            |
| 9  |                       | $I_0$               | А                 | 9,45                            |
| 10 |                       | $K_2$               | о.е.              | 1                               |
| 11 |                       | $K_0$               | о.е.              | 1                               |
| 12 | Трансформатор $Y/Y_0$ | $\Delta P_1$        | Вт                | 54,11                           |
| 13 |                       | $\Delta P_2$        | Вт                | 54,11                           |
| 14 |                       | $\Delta P_0$        | Вт                | 728,54                          |
| 15 |                       | $\Delta P_\epsilon$ | Вт                | 782,65                          |
| 16 |                       | $K_\epsilon$        | о.е.              | 14,46                           |
| 17 | ЛЭП 0,38 кВ           | $\Delta P_1$        | Вт                | 64,28                           |
| 18 |                       | $\Delta P_2$        | Вт                | 64,28                           |
| 19 |                       | $\Delta P_0$        | Вт                | 204,10                          |
| 20 |                       | $\Delta P_\epsilon$ | Вт                | 332,67                          |
| 21 |                       | $K_\epsilon$        | о.е.              | 4,175                           |

Таблица 4

**Результаты расчетов несимметричных режимов**

Table 4

**The calculation results for asymmetric modes**

| Трансформатор | Однофазный |         |       | Двухфазный |         |       |
|---------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|               | Нагрузка   | Потери  |       | Нагрузка   | Потери  |       |
|               | Вт         | Вт      | %     | Вт         | Вт      | %     |
| $Y/Y_0$       | 2865,54    | 1169,42 | 40,81 | 9291,93    | 1166,73 | 12,56 |
| $Y/Z_0$       | 4666,13    | 473,22  | 10,14 | 10356,44   | 824,87  | 7,96  |

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы: в городских и сельских сетях с КБН уже на стадии проектирования сети необходимо ставить целью снижение потерь и повышение качества ЭЭ [7].

Однофазные электроприемники большей мощности нужно включать в трехфазную сеть через симметрирующие устройства.

Проектируемую при симметричном режиме трехфазную сеть с КБН следует рассчитать с помощью программы «Потери энергии», разработанной при несимметричном режиме по статистическим характеристикам несимметрии токов в сетях 0,4 кВ. В зависимости от результатов расчета показателей несимметрии напряжений следует применять трансформаторы  $Y/Y_0$  или  $Y/Z_n$ . Если значение расчетного коэффициента  $K_{ns}$  менее 1,3, а коэффициент несимметрии напряжений нулевой последовательности  $K_{0U}$  в 2–3 раза превышает установленную норму [9, 10, 13–15], следует применять трансформатор  $Y/Y_0$ . Если  $K_{ns}$  более 1,3, а  $K_{0U}$  превышает норму более чем в 3 раза, необходимо применять трансформатор  $Y/Z_0$ .

В условиях эксплуатации сетей с КБН необходимо хотя бы раз в год измерять показатели качества ЭЭ. В тех случаях, когда показатели несимметрии напряжений существенно отличаются от установленных норм, нужно применять следующие меры: отслужившие срок эксплуатации трансформаторы  $Y/Y_0$  необходимо заменить на трансформаторы  $Y/Y_0$  или  $Y/Z_0$ ; трансформаторы  $Y/Y_0$  с малым сроком эксплуатации следует временно выводить из работы для проведения ремонта, во время которого устанавливать в нем симметрирующую обмотку (аналогичную трансформатору  $Y/Y_0$ ); в случаях, когда замена трансформатора  $Y/Y_0$  невозможна, устанавливать на выходе трансформатора  $Y/Y_0$  фильтросимметрирующее устройство, которое одновременно со снижением показателей несимметрии напряжений будет компенсировать реактивную мощность [10, 13–15].

Результаты расчета коэффициента несимметрии с учетом разных схем соединения трансформаторов по формулам (2–4) и по общей информации по формуле (6) имеют погрешности в расчете коэффициента несимметрии, достигающие до 50 %.

Таким образом, трансформаторы с трансформатором  $Y/Z_0$  имеют преимущество, заключающееся в наличии несимметричных распределительных сетей напряжением 0,38 кВ.

Применение указанных мер позволит существенно снизить потери и повысить качество ЭЭ в сетях 0,4 кВ с КБН.

Актуальна оценка дополнительных потерь активной мощности, обусловленных отклонением ПКЭ от нормативов.

Значения величин дополнительных потерь мощности в отдельных элементах распределительной сети в условиях несимметричного режима работы необходимы для оценки суммарной доли вышеназванных потерь в общей величине потерь и определения экономического ущерба, обусловленного снижением ПКЭ. Без этих значений затруднительно произвести предварительные расчеты экономической целесообразности проведения мероприятий по повышению качества ЭЭ.

### Заключение

Для определения ПКЭ параметры режима в распределительной электросети 0,4 кВ регистрировались в течение трех дней летнего сезона. Измерения показали, что нормы ПКЭ нарушены и имеется необходимость перехода на современные системы электроснабжения, отвечающие требованиям ПКЭ.

Традиционная схема электроснабжения потребителей на удаленных расстояниях сельских распределительных сетей 10/0,4 кВ зачастую не обеспечивает соответствующее качество ЭЭ. Для этого предлагается переход на схемы электроснабжения, обеспечивающие качество, надежность и эффективность потребителей ЭЭ.

Снижение потерь ЭЭ и повышение ПКЭ с потребителями следует начинать с проектирования сети. Желательно заменять трансформаторы со схемой подключения  $Y/Y_0$  мощностью 25–100 кВА на  $Y/Z_0$ .

Однофазные потребители большой мощности должны подключаться к трехфазной сети.

Авторы разработали программу для расчета несимметричных режимов и потерь мощности для четырехпроводных электрических сетей 0,38 кВ режимов с нулевым проводом. В электрических сетях низкого напряжения рекомендуется рассчитывать потери ЭЭ с помощью ПО с учетом несимметричности нагрузки.

В результате предложенных мер можно добиться значительного снижения потерь ЭЭ в несимметрично нагруженной электрической сети низкого напряжения и повысить ПКЭ.

### Литература

1. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н., Пекелис В.Г., Файбисович Д.Л. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.

2. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2003. 280 с.
3. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
4. Железко Ю.С. Методы расчета нагрузочных потерь электроэнергии в радиальных сетях 0,38–20 кВ по обобщенным параметрам схем // Электрические станции. 2006. № 1. С. 31–37.
5. Будзко И.А., Левин М.С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. М.: Агропромиздат, 1985. 320 с.
6. Левин М.С., Лещинская Т.Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,4 кВ // Электричество. 1999. № 5. С. 18–22.
7. Воротничкий В.Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения // Энергоэксперт. 2007. № 3. С. 10–19.
8. Зотов А.А. Смешанная трехфазно-однофазная система распределения электроэнергии // Энергетик. 2007. № 11. С. 18–22.
9. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. № 6. С. 8–12.
10. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Петров В.Ф., Криштопа Н.Ю. Экспериментальное исследование потерь мощности от несимметрии токов в трехфазных трансформаторах и четырехпроводных линиях 0,38 кВ // Электротехника. 2018. № 2. С. 47–51.
11. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Программирование в Delphi 7. СПб: БХВ-Петербург, 2003. 784 с.
12. Littelfuse. Symmetrical component calculator series – relay interface software. URL: <https://www.littelfuse.com/products/protection-relays-and-controls/protection-relays/relay-software/symmetrical-component-calculator.aspx> (дата обращения: 30.01.2020).
13. Баламетов А.Б. Методы расчета потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем. Баку, 2006. 337 с.
14. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. О программе расчета потерь электроэнергии в радиальных электрических сетях // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 220–224.
15. Balametov A.B., Salimova A.K., Gadzhiev N.I., Balametov E.A. About measures to reduce power losses from current asymmetry in 0.4 kV networks. Proc. 15th ICTPE Conf., Istanbul Rumeli, Turkey, 2019, pp. 17–21.

Software &amp; Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.130.328-335

Received 04.02.20

2020, vol. 33, no. 2, pp. 328–335

### About software for planning measures to reduce power losses from current asymmetry in 0,4 kV networks

**A.B. Balametov**<sup>1</sup>, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, balametov.aznie@gmail.com*

**A.K. Salimova**<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary, afag\_sk@mail.ru*

**N.I. Gadzhiev**<sup>2</sup>, *Vice-rector, Senior Lecturer, Department of Electromechanics, naib.haciyev.sdu@mail.ru*

**E.A. Balametov**<sup>3</sup>, *Ph.D. (Engineering), Senior Shift Engineer*

<sup>1</sup> *Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, AZ1010, Azerbaijan*

<sup>2</sup> *Sumgait State University, Sumgait, AZ5008, Azerbaijan*

<sup>3</sup> *Azerishyg Ltd, Baku, AZ1008, Azerbaijan*

**Abstract.** The increase in the electric receiver power with non-linear and asymmetric load character affects the deterioration of the electric energy quality in power supply systems. As a result, electrical equipment designed to operate in the electrical system at a certain level of electrical energy characteristics is operated in inefficient modes. This leads to a decrease in the efficiency of both the power supply systems themselves and the consumers connected to them. As a result, there is growing interest in calculating power losses from current and voltage asymmetry in 0,4 kV electric networks and in the corresponding software for estimating power losses from current and voltage asymmetry in electric networks.

To determine the electricity quality in 0,4 kV electric networks, measurements were with using the SIMEAS q device. The voltage in the phases is asymmetric and varies between 211–228 V, while at the end



of the feeder, the voltage varies between 145 and 228 V. The change in active power on the head section of the feeder for a day is 2–7 kW, in the load phases varies within 15–50 % of the full load, the change in reactive power in the phases is within 0,8–1,6 kVAr. Consumers with non-linear and non-symmetrical load patterns that are far from the power center have less than normal voltage levels during 30 % of the day.

The authors developed a program for calculating asymmetric modes and power losses for four-wire electrical networks of 0,38 kV modes with zero wire. There is a power loss calculation for asymmetric modes of a four-wire electric network with zero wire.

**Keywords:** electric networks 0,4 kV, power quality, asymmetric load, current unbalance, measurements, power quality indicators, power losses.

### References

1. Vorotnitsky V.E., Zhelezko Yu.S., Kazantsev V.N., Pekelis V.G., Faybisovich D.L. *Energy Loss in Electric Networks of Power Systems*. Moscow, 1983, 368 p. (in Russ.).
2. Zhelezko Yu.S., Artemev A.V., Savchenko O.V. *Calculation, Analysis and Rationing of Energy Losses in Electric Networks: A Practical Guide*. Moscow, 2003, 280 p. (in Russ.).
3. Zhelezko Yu.S. *Energy Loss. Reactive Power. Power Quality: A Practical Guide*. Moscow, 2009, 456 p. (in Russ.).
4. Zhelezko Yu.S. Methods for calculating electricity load losses in radial networks of 0.38-20 kV according to the generalized circuit parameters. *Power Plants*, 2006, no. 1, pp. 31–37 (in Russ.).
5. Budzko I.A., Levin M.S. *Power Supply of Agricultural Enterprises and Settlements*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985, 320 p. (in Russ.).
6. Levin M.S., Leshchinskaya T.B. Analysis of asymmetric modes of rural networks 0.4 kV. *Electricity*, 1999, no. 5, pp. 18–22 (in Russ.).
7. Vorotnitsky V.E. Rationing and reduction of energy losses in electric networks: results, problems, solutions. *Energoekspert*, 2007, no. 3, pp. 10–19 (in Russ.).
8. Zotov A.A. Mixed three-phase-single-phase power distribution system. *Power Engineer*, 2007, no. 11, pp. 18–22 (in Russ.).
9. Kosoukhov F.D., Vasilev N.V., Filippov A.O. Reducing losses from current asymmetry and improving the quality of electric energy in networks of 0.38 kV with household loads. *Electrical Engineering*, 2014, no. 6, pp. 8–12 (in Russ.).
10. Kosoukhov F.D., Vasilev N.V., Petrov V.F., Krishtopa N.Yu. An experimental study of power losses due to current asymmetry in three-phase transformers and four-wire 0.38 kV lines. *Electrical Engineering*, 2018, no. 2, pp. 47–51 (in Russ.).
11. Darakhvelidze P.G., Markov E.P. *Delphi 7 Programming*. St. Petersburg, 2003, 784 p. (in Russ.).
12. Littelfuse. *Symmetrical Component Calculator Series – Relay Interface Software*. Available at: <https://www.littelfuse.com/products/protection-relays-and-controls/protection-relays/relay-software/symmetrical-component-calculator.aspx> (accessed January 30, 2020).
13. Balametov A.B. *Methods for Calculating Power and Energy Losses in Electric Networks of Power Systems*. Baku, 2006, 337 p. (in Russ.).
14. Balametov A.B., Halilov E.D. About the program of electric power losses calculation in radial electric mains. *Software & Systems*, 2013, no. 2, pp. 220–224 (in Russ.).
15. Balametov A.B., Salimova A.K., Gadzhiev N.I., Balametov E.A. About measures to reduce power losses from current asymmetry in 0.4 kV networks. *Proc. 15th ICTPE Conf.*, Istanbul Rumeli, Turkey, 2019, pp. 17–21.

### Для цитирования

Баламетов А.Б., Салимова А.К., Гаджиев Н.И., Баламетов Э.А. О программном обеспечении для планирования мероприятий по снижению потерь мощности от несимметрии токов в сетях 0,4 кВ // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 328–335. DOI: 10.15827/0236-235X.130.328-335.

### For citation

Balametov A.B., Salimova A.K., N.I. Gadzhiev, Balametov E.A. About software for planning measures to reduce power losses from current asymmetry in 0,4 kV networks. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 328–335 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.328-335.

УДК 629.7.018  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.336-342

Дата подачи статьи: 25.10.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 336–342

## **Требования к программной среде автоматизированной обработки полетных данных**

*Е.М. Еремин*<sup>1</sup>, инженер-испытатель, *jenya.eryomin2014@yandex.ru*  
*А.В. Назорнов*<sup>1</sup>, зам. начальника отдела, начальник отделения,  
*alexnaornov77@bk.ru*

<sup>1</sup> Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова,  
г. Щелково, 141110, Россия

С середины прошлого века в испытаниях летательных аппаратов, а также в летных исследованиях и полунатурных экспериментах по авиационной тематике существует задача автоматизированной обработки табличных временных рядов экспериментальных данных. Современные программные средства обработки данных обеспечивают успешное решение задач анализа полетной информации, но универсальной программной среды для этих целей не существует: авиационные специалисты сталкиваются с необходимостью использования нескольких разных приложений, что замедляет работу. Этим обусловлена актуальность задачи создания специализированной программной среды, ориентированной на потребности авиационной тематики.

Для формирования требований к новой программной среде рассмотрены типовые элементы работы с полетной информацией: фильтрация данных по заданным критериям, визуализация динамики процесса на графике зависимости параметра от времени, добавление производных временных рядов, визуализация данных на графике зависимости параметра от другого параметра, определение значения обобщающего расчетного показателя на основе всей записи или ее фрагмента, определение взаимосвязей между параметрами, построение моделей множественной линейной и нелинейной регрессии.

Для каждого из типовых элементов приведен пример из практической работы с результатами выполнения экспериментов. Также приведены примеры существующих приложений, решающих конкретные задачи с приемлемым или максимально возможным качеством.

Рассмотрена общая архитектура системы. Предложены использование схемы «модель–вид–контроллер», разработка на языке программирования C++ с использованием паттернов объектно-ориентированного программирования «наблюдатель», «компоновщик» и «стратегия», а также код основы класса Row, каждый объект которого содержит один столбец таблицы данных. Количественные данные столбца таблицы в объекте класса Row размещаются в стандартном контейнере C++ vector, содержащем элементы типа double.

**Ключевые слова:** полетная информация, обработка экспериментальных данных, сглаживание временных рядов, построение графиков, регрессионные модели, требования к программной продукции, архитектура приложения.

Важнейшей составляющей жизненного цикла программного продукта является этап, предшествующий написанию кода. При этом одна из главных проблем – требования к будущему приложению: ошибки, допускаемые при их выявлении и формализации, имеют, с одной стороны, высокую цену устранения, а с другой – большую частоту встречаемости в реальных проектах [1–3].

В статье рассмотрена работа с регистрируемыми значениями параметров, прямо или косвенно относящихся к описанию динамики полета *летательного аппарата* (ЛА). Такие данные записываются *системами бортовых измерений* (СБИ), системами объективного контроля ЛА и некоторыми другими. Результатом записи является таблица, содержащая вре-

менные ряды (функцию зависимости от времени) по каждому из параметров.

Автоматизированная обработка табличных временных рядов осуществляется в испытаниях ЛА, летных и полунатурных исследованиях с середины прошлого века.

Многие десятилетия размер исходных данных практически не меняется: ориентировочный объем записи летного эксперимента начала 1960-х гг. (до 100 столбцов и 180 тыс. строк [4]) актуален и в настоящее время. При этом принципиально выросли возможности извлечения полезной информации из экспериментальных данных [5], что обусловлено ростом производительности и памяти вычислительной техники в совокупности с улучшением эргономики компьютеров и их программ.

Сегодня важнейшую роль в обработке данных играют возможности используемой специализированной программной среды. Большинство современных инструментов реализуют идеологию WYSIWYG (сокращение от what you see is what you get, или что ты видишь, то и получаешь). Существуют мощные программные продукты, обеспечивающие простой и удобный для пользователя вызов разнообразных встроенных алгоритмов обработки данных. Эти возможности совмещены с поэлементными настройками отображения данных на графиках, вводом данных из файлов различных форматов и многими другими полезными опциями.

Обработка полетной информации состоит из довольно специфичного набора действий с данными. При всех достоинствах современных сред обработки информации ни одна из них не является хорошим решением для всего перечня задач. Подобная ситуация не уникальна. Существование общей проблемы использования унифицированного ПО в организациях научно-исследовательского профиля отмечено в исследовании специалистов Иркутского национального исследовательского технического университета [6]. В качестве иллюстрации этого тезиса можно рассмотреть пример обработки информации в химико-технологической системе [7]: для решения практической задачи потребовалось использование четырех программных сред – TableCurve 2D, TableCurve 3D, MATLAB и Enterprise Workbench 2k.

Стоит отметить, что большинство отдельно взятых задач обработки полетной информации имеют хорошее решение минимум в одном из существующих приложений.

Идеальная программная среда должна объединять в себе определенные возможности нескольких уже существующих систем. Это важно с точки зрения проблемы формирования требований: наличие готового примера

реализации не заменит удачную формулировку желаемых свойств системы, но послужит их наглядной иллюстрацией.

Рассмотрим более детально конкретные задачи обработки полетных данных.

**Фильтрация данных таблицы по заданному критерию.** Данная задача позволяет определять строки, для которых вектор мгновенного состояния системы (режим полета ЛА) соответствует заданным условиям.

Пример: поиск режимов полета, соответствующих висению вертолета вне зоны влияния земли. Задача решается проверкой составного условия по параметрам, отражающим геометрическую высоту (данные радиовысотомера) и составляющие вектора скорости (данные внешнетраекторных измерений). Уточнение задачи (например, висение вне зоны влияния земли правым боком к ветру с заданным качеством стабилизации) добавляет новые условия фильтрации.

Существующие приложения: MS Excel.

**Визуализация динамики процесса на графике зависимости параметра от времени.**

Пример: построение графика изменения параметров полета ЛА после выведения его из состояния сбалансированного полета импульсным управляющим воздействием. На рисунках 1 и 2 приведены записи режимов «импульс ручкой циклического шага», выполненных на вертолете Ка-52Э в ходе летного эксперимента. Ручка отклонялась летчиком соответственно от

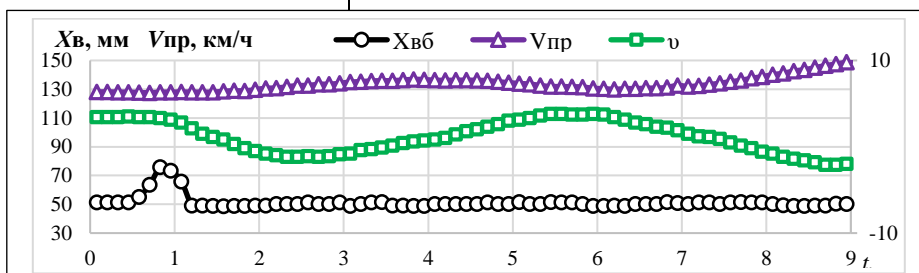


Рис. 1. Импульс ручкой управления от себя, реакция вертолета

Fig. 1. Central stick push impulse, helicopter reaction

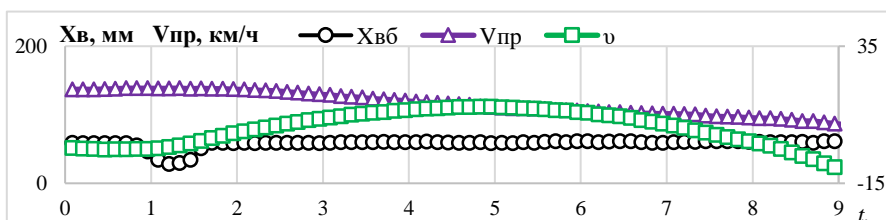


Рис. 2. Импульс ручкой управления на себя, реакция вертолета

Fig. 2. Central stick pull impulse, helicopter reaction

себя и на себя (положение ручки характеризуется величиной  $Xв$ ). Визуализация позволяет оценить поведение вертолета в первые секунды свободного движения. Здесь показаны приборная скорость  $Vпр$  и угол тангажа  $\nu$ . На практике рассматриваются и другие регистрируемые и расчетные параметры.

Существующие приложения: PTC MathCad, Ivan Johansen Graph, Alentum Software Advanced Grapher, FBK Studio Software Grapher.

**Добавление производных временных рядов** (сглаживающие, интегрирующие, дифференцирующие ряды, ряды расчетных значений физических величин, не регистрировавшихся СБИ или нуждающихся в проверке точности регистрации).

Пример: добавление к данным рисунка 2 расчетных значений угловой скорости движения вертолета в продольном канале (рис. 3).

Существующие приложения: интерполяция и аппроксимация – Systat Software TableCurve 2D, ряды расчетных значений по формулам пользователя – MS Excel.

**Визуализация данных на графике зависимости параметра от другого параметра.**

Пример: проверка корректности регистрируемых значений параметра построением функциональной зависимости регистрируемого и расчетного значений. На рисунке 4 показана проверка регистрации СБИ самолета Да-42Т значений угла атаки ( $\alpha$ ). Положительный результат проверки соответствует группированию облака точек вблизи линии  $y = x$  (значение первого коэффициента уравнения регрессии близко к 1, второго – к 0, коэффициента детерминации – к 1). Очевидно, что представленные данные иллюстрируют некорректную работу СБИ.

Существующие приложения: PTC

MathCad, Ivan Johansen Graph, FBK Studio Software Grapher.

**Определение значения обобщающего расчетного показателя на основе всей записи или ее фрагмента (режима).** Пример: определение балансировочного положения органа управления для заданных условий по данным выполнения режима «площадка». Режим характеризуется постоянством скорости, высоты и углового положения вертолета (все силы и моменты, действующие на вертолет, скомпенсированы). На рисунке 5 приведена одна из балансировочных характеристик вертолета Ка-52Э, построенная по результатам испытаний. Значение параметра  $Xв$  для каждой точки графика получено обработкой записи отдельного режима полета.

Существующие приложения: MS Excel, PTC MathCad.

**Определение взаимосвязей между параметрами, построение моделей множественной линейной и нелинейной регрессии.**

Пример: построение модели движения вертолета в продольном канале путем вычисления значений коэффициентов дифференциального уравнения движения вертолета (коэффициенты

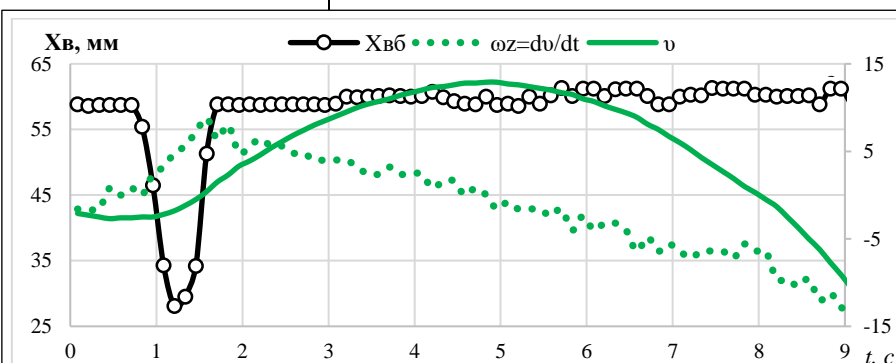


Рис. 3. Численное дифференцирование ряда «угол тангажа» по времени

Fig. 3. Numerical differentiation of the "pitch angle" series in time

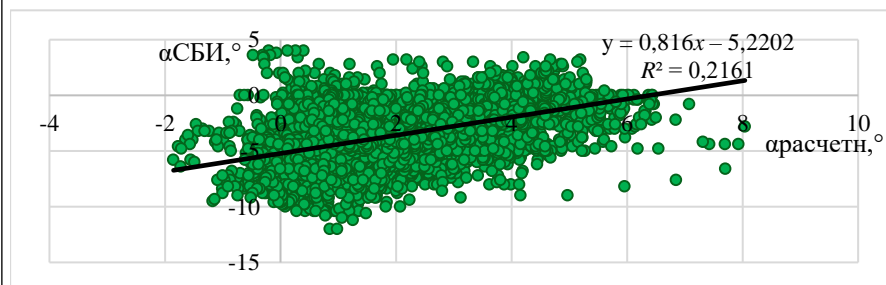


Рис. 4. Проверка корректности работы системы бортовых измерений, регистрация угла атаки

Fig. 4. The onboard measurement system checking, attack angle registration

демпфирования, эффективности управления и устойчивости по скорости).

На рисунке 6 приведены данные для оценки адекватности модели движения вертолета Ка-52Э в продольном канале, полученной на основе множественной линейной регрессии по массиву из нескольких десятков тысяч точек. Очевидно, что исследуемая модель не демонстрирует высокое качество, воспроизводя с высокой точностью лишь первую реакцию на интенсивное возмущение входного сигнала. Для повышения точности модели требуется усложнение ее вида.

Существующие приложения: множественная линейная регрессия для произвольного числа аргументов – Dell Statistica или MS Excel с расширяющим пакетом «Анализ данных», множественная нелинейная регрессия для функции двух аргументов – Systat Software TableCurve 3D, множественная нелинейная регрессия с числом аргументов более двух требует написания дополнительного кода для расширения готовых программных продуктов, например, на языке visual basic for applications для MS Excel.

Приведенный перечень представляет основные функциональные требования к программной среде обработки полетных данных.

Список требований, отталкивающихся от достоинств существующих систем, следует дополнить списком требований, отталкивающихся от их недостатков:

- программная среда должна работать с файлами максимального размера (ограничения приведены выше);
- программная среда должна обеспечивать быстрое (насколько позволяет аппаратная со-

ставляющая) выполнение вычислений;

– взаимодействие пользователя с графическим интерфейсом должно быть построено в соответствии с эргономическим принципом «наименьшего удивления».

Важнейшим требованием к создаваемой системе следует считать приспособленность к итерационному наращиванию функционала. Ни один список требований не может считаться исчерпывающим, поскольку в перспективе неизбежно появятся новые потребности, например, по использованию искусственных нейронных сетей. Для обеспечения простоты доработок архитектура системы должна быть модульной. В ее основе следует использовать решения, показавшие эффективность в управлении сложностью кода.

Исходя из имеющегося перечня требований, целесообразно для реализации системы использовать язык программирования C++. Этот язык является одним из лучших по скорости действия и экономии памяти [8], что имеет важное значение, например, для решения ре-

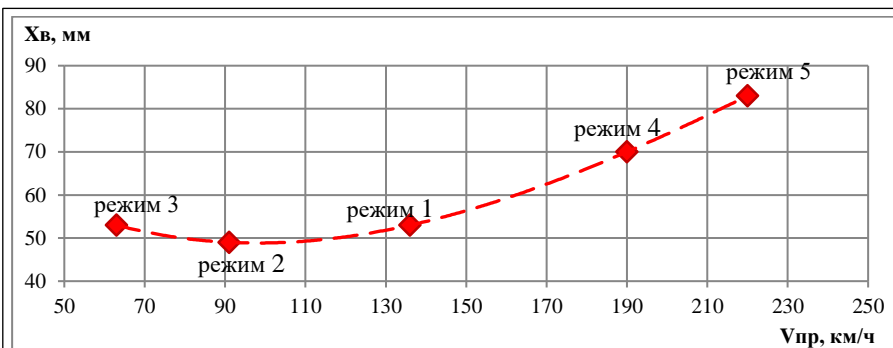


Рис. 5. Балансировочная характеристика вертолета

Fig. 5. The helicopter balancing characteristics

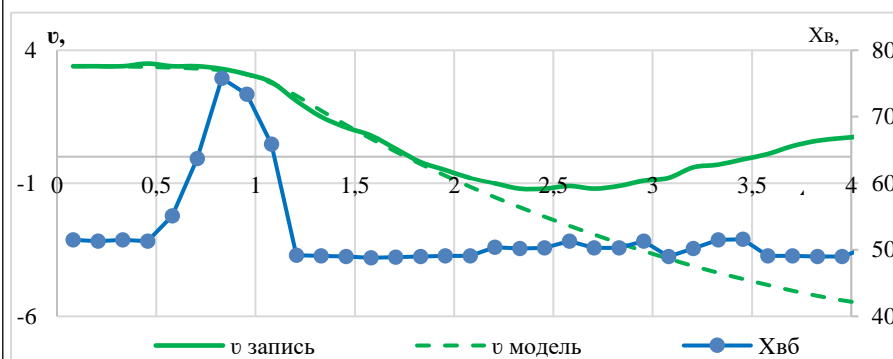


Рис. 6. Валидация модели поведения вертолета, построенной методом множественной линейной регрессии

Fig. 6. The helicopter behavior model validation constructed by the multiple linear regression method

грессионных задач с большими входными данными на компьютерах, не обладающих высокими техническими характеристиками. Кроме того, он поддерживает объектно-ориентированное программирование с его концепциями, обеспечивающими модульность и повторное использование кода [9]. C++ поддерживает применение набора проверенных решений в организации кода – паттернов проектирования. В частности, для создания приложений рассматриваемой категории применяется архитектура «модель–вид–контроллер», реализуемая применением паттернов «наблюдатель», «компоновщик» и «стратегия» [10].

Программное решение для размещения данных (компонента «модель») следует искать прежде всего среди стандартных контейнеров C++. Наиболее подходящим из них представляется `vector`. Размещением данных каждого ряда внутри своего объекта `vector` обеспечивает, с одной стороны, гибкость в использовании памяти, а с другой, высокую скорость случайного (произвольного) доступа [11]. Максимальное количество элементов ряда при использовании контейнера `vector` ограничивается только памятью компьютера.

Сами ряды целесообразно реализовать в виде объектов пользовательского класса, основа которого показана в листинге:

```
#include <vector> //для использования контейнера vector
#include <string> //для использования строк
string
class Row
{
public:
//настройка названия ряда:
void setName (string paramName);
//присвоение значения val элементу ряда с номером itemNum:
void setValue (double val, int itemNum);
//добавление нового элемента со значением val в конец ряда:
void addValue (double val);
//функции выдачи названия ряда и значения его элемента по номеру:
string getName ();
double getValue (int numberOfVal);
/*Здесь находятся другие необходимые функции, в том числе конструкторы и деструктор*/
```

```
protected:
string name; //имя ряда данных
vector <double> data; //ряд данных – вещественных чисел
};
```

Для поля `Row::data` выбран тип `double`, поскольку подавляющее большинство регистрируемых параметров имеют вещественный тип. Целочисленные данные, включая логические «0» и «1», встречаются гораздо реже, поэтому случаи неявного приведения типов не окажут существенного влияния на экономию памяти.

Дополнительная открытая функция `Row::addValue()`, изменяющая поле `Row::data`, предназначена для вызова внешним кодом при заполнении пустого ряда значениями. Пример такой ситуации – заполнение значениями, считываемыми построчно из файла исходных данных.

Выбор контейнера для размещения самих объектов класса `Row` в меньшей степени влияет на эффективность программы, поскольку количество этих объектов (столбцов таблицы) обычно на два-три порядка меньше количества элементов поля `Row::data` (количества строк). Если в случае реализации поля `Row::data` определяющим фактором является скорость случайного доступа к элементам данных, то для контейнера, вмещающего сами объекты класса `Row`, может быть важна также скорость вставки и удаления элементов, что делает предпочтительным шаблон `list`. Окончательное решение должно быть принято по результатам проработки альтернативных вариантов.

### Заключение

На основе практического опыта анализа полетной информации сформулированы требования к программной среде автоматизированной обработки полетных данных в терминах предметной области. Задачи создаваемой системы соотнесены с примерами существующих систем, подтвердивших свою практическую применимость.

Составленный список общих задач системы следует использовать для выработки требований в терминах программирования и их реализации в коде проекта. Приведенные рекомендации целесообразно использовать в архитектуре проекта.

### Литература

1. Гутгарц Р.Д., Провилков Е.И. О формализации функциональных требований в проектах по созданию информационных систем // Программные продукты и системы. 2019. № 3. С. 349–357. DOI: 10.15827/0236- 235X.127.349-357.

2. Wiegers K., Beatty J. Software Requirements. USA, Microsoft Press, 2013, 637 p.
3. Макконнелл С. Совершенный код. Практическое руководство по разработке программного обеспечения. М., 2010. 896 с.
4. Кантор А.В. Аппаратура и методы измерений при испытаниях ракет. М., 1963. 520 с.
5. Еремин Е.М., Атрошенко А.И., Антошин А.А., Дроздовский А.Ю. Определение пилотажных характеристик модели вертолета авиационного тренажера КТ-8АМТШ // Проблемы безопасности полетов. 2019. № 1. С. 10–17.
6. Гутгарц Р.Д., Полякова П.М. Анализ особенностей формулирования функциональных требований к автоматизированной информационной системе // Программные продукты и системы. 2019. № 3. С. 358–367.
7. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Математические модели реограмм состояния в программах Table Curve 2D/3D как основа интеллектуальной системы управления процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов // Программные продукты и системы. 2017. № 4. С. 770–777. DOI: 10.15827/0236-235X.120.0.
8. Pereira R., Couto M., Ribeiro F., Rua R., Cunha J., Fernandes J.P., Saraiva J. Energy efficiency across programming languages. How do energy, time, and memory relate. Proc. 10th ACM SIGPLAN Intern. Conf. on SLE, Vancouver, Canada, 2017, pp. 256–267.
9. Спролл А. Думай как программист: креативный подход к созданию кода. C++ версия. М., 2018. 272 с.
10. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Д. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб, 2019. 368 с.
11. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. СПб, 2019. 928 с.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.336-342

Received 25.10.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 336–342

### Requirements for the software environment of automated flight data analysis

*E.M. Eremin*<sup>1</sup>, Test Engineer, *jenya.eryomin2014@yandex.ru*

*A.V. Nagornov*<sup>1</sup>, Deputy Head of Department – Branch Manager, *alexnagornov77@bk.ru*

<sup>1</sup> *Chkalov State Flight Test Center, Shchelkovo, 141110, Russian Federation*

**Abstract.** In aircraft tests, as well as in flight researches and semi-natural experiments on aviation issues since the middle of the last century, there is an automated processing problem for the tabular time series of experimental data. Modern data analysis software provides a solution to the flight information analysis problems, but a universal software environment for these purposes does not exist: aviation professionals encounter with the necessity to use several different applications, which slows down the work. An urgent problem is to create a specialized software environment focused on aviation topic needs.

To produce the requirements for the new software environment, there are the working typical elements with flight information: data filtering according to specified criteria, process dynamics visualization on the graph of parameter dependence on time, time-series derivatives addition, data visualization on the graph of parameter dependence on another parameter, determination of the generalizing calculated indicator value on the entire record or its fragment basis, relationship determination between parameters, multiple linear constructions and nonlinear regression models.

For each of the standard elements, there is a practical work example with the performing experiment results. There are also existing application examples that solve specific problems with acceptable or maximum possible quality.

This paper contains the system general architecture. The authors proposed the use of the model–view–controller scheme, development in the C++ programming language using the object-oriented programming patterns observer, linker and strategy, as well as the Row class basic code, each object of which contains one data table column. The quantitative data of a table column in an object of the Row class is in the standard C++ vector container, which contains double type elements.

**Keywords:** flight information, experimental data analysis, time series smoothing, plotting, regression models, software requirements, application architecture.

### References

1. Gutgarts R.D., Provilkov E.I. On the formalization of functional requirements in information system projects. *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 3, pp. 349–357 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.127.349-357.
2. Wiegers K., Beatty J. *Software Requirements*. USA, Microsoft Press, 2013, 637 p.
3. McConnell S. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. USA, Washington: Microsoft Press, 2004, 960 p. (Russ. ed.: Moscow, 2010, 896 p.).
4. Kantor A.V. *Instrumentation and Measurement Methods for Missile Tests*. Moscow, 1963, 520 p. (in Russ.).
5. Eremin E.M., Atroshenko A.I., Antoshin A.A., Drozdovsky A.Yu. Determination of flight characteristics of the flight simulator KT-8AMTSH helicopter model. *Flights Safety Troubles*, 2019, no. 1, pp. 10–17 (in Russ.).
6. Gutgarts R.D., Polyakova P.M. Analysis of formulation features of functional requirements to an automated information system. *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 3, pp. 358–367 (in Russ.).
7. Kuznetsov A.S., Korniyushko V.F. Mathematical models of rheograms of states in Table Curve 2d/3d programs as a basis of the intelligent system for managing structuring processes of multicomponent elastomer composites. *Software & Systems*, 2017, vol. 30, no. 4, pp. 770–777 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.120.0.
8. Pereira R., Couto M., Ribeiro F., Rua R., Cunha J., Fernandes J.P., Saraiva J. Energy efficiency across programming languages. How do energy, time, and memory relate. *Proc. 10th ACM SIGPLAN Intern. Conf. on SLE*, Vancouver, Canada, 2017, pp. 256–267.
9. Spraul A. *Think Like a Programmer: An Introduction to Creative Problem Solving*. Edwards Brothers Malloy Publ., 2012, 315 p. (Russ. ed.: Moscow, 2018, 272 p.).
10. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. *Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison–Wesley Publ., 1995, 395 p. (Russ. ed.: St. Petersburg, 2019, 368 p.).
11. Lafore R. *Object-Oriented Programming in C++*. Indianapolis, Sams Publ., 2002, 1040 p. (Russ. ed.: St. Petersburg, 2019, 928 p.).

### Для цитирования

Еремин Е.М., Нагорнов А.В. Требования к программной среде автоматизированной обработки полетных данных // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 336–342. DOI: 10.15827/0236-235X.130.336-342.

### For citation

Eremin E.M., Nagornov A.V. Requirements for the software environment of automated flight data analysis. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 336–342 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.336-342.



УДК 684.511  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348

Дата подачи статьи: 30.01.20  
2020. Т. 33. № 2. С. 343–348

## **Настройка и обучение многослойного персептрона для задачи выделения дорожного покрытия на космических снимках города**

*В.С. Тормозов*<sup>1</sup>, ст. преподаватель, 007465@pnu.edu.ru

*К.А. Василенко*<sup>2</sup>, преподаватель, k2857@mail.ru

*А.А. Золкин*<sup>3</sup>, к.т.н., преподаватель, alzolkin@list.ru

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, 680035, Россия

<sup>2</sup> Колледж сервиса и дизайна при Владивостокском университете экономики и сервиса (ВГУЭС), г. Владивосток, 690092, Россия

<sup>3</sup> Самарский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, г. Самара, 443099, Россия

Статья посвящена применению нейросетевой модели многослойного персептрона к задаче выделения регионов дорожного покрытия на космических снимках городской среды. Решения ее в настоящее время востребованы государственными структурами и предприятиями, занимающимися регулированием транспортных потоков, перевозками в условиях города, а также обновлением географических данных и карт транспортной инфраструктуры.

В существующих работах по данной тематике отмечалось, что методы классифицируют на автоматические и полуавтоматические. Подходы, предполагающие частичную вовлеченность человека в его работу, относят к полуавтоматическим. Оператор может задавать пороговые значения, настроечные параметры, отмечать регионы для детектирования и выполнять многие другие операции. Автоматические методы работают без участия человека и, следовательно, быстрее и дешевле полуавтоматических.

В статье рассматривается и исследуется метод, применяющий многослойную нейронную сеть для автоматического выделения дорожного покрытия на космических снимках земной поверхности. Его работа основана на ограниченной выборке ранее отмеченных примеров дорожного полотна. Модель построена на основе многослойного персептрона. Входными значениями для рассматриваемого метода являются данные спутниковой съемки в цветовой модели RGB. Это дает возможность задействовать больше информационных каналов, работая с каждым из них отдельно. При этом учитывается контекст каналов пикселя – значения цветочных каналов соседних пикселей изображения.

Рассматриваемый метод актуален, так как в связи с расширением улично-дорожной сети и застройкой городской среды происходят изменения, которые должны быть отражены в картографических данных. В рамках исследования выполнено соотнесение результатов работы метода с расположением дорожного покрытия улично-дорожной сети города.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, искусственный интеллект, машинное обучение, распознавание образов, детектирование дорожного полотна, уличная дорожная сеть, искусственная нейронная сеть, спутниковые снимки.

Городская автодорожная инфраструктура является одной из самых важных для построения карт местности на основе спутниковых изображений. При приобретении и обновлении географической информации, как правило, необходимо привлечение ручного труда [1], который требует значительных временных и материальных затрат. Процедура детектирования дорожного полотна предоставляет средства для создания, поддержания и обновления транспортной сети и может быть использована для решения многих других практических задач, относящихся к регулированию транспортных потоков и грузоперевозок. Значительный

объем обрабатываемых данных позволяет предположить, что облачное хранение улучшит технологическую базу процессов обновления данных геоинформационных систем (ГИС) [2]. Качественное детектирование дорожного покрытия на спутниковых снимках может оказать помощь при исследовании глобальных изменений дорожной сети, а также найти применение для решения ряда других исследовательских задач [1, 3]. Постоянный рост доступности спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения способствует расширению областей его применения в практических задачах [1, 3].

На сегодняшний день разработан целый спектр методов детектирования дорожного покрытия на космических снимках [4, 5]. Среди них выделяют автоматический и полуавтоматический методы. Подход, предполагающий частичную вовлеченность человека в его работу, относится к полуавтоматическим. Оператор может задавать пороговые значения, настроечные параметры, отмечать регионы для детектирования и выполнять ряд других операций. Автоматические методы работают без участия человека и, следовательно, быстрее и дешевле полуавтоматических.

Большинство работ, связанных с обнаружением дорожного покрытия на космических снимках, используют снимки среднего или низкого пространственного разрешения и, как правило, имеют погрешности, связанные с методами обработки данных дистанционного зондирования [4, 5].

Методы идентификации простых фигур на изображении обрабатывают каждый пиксель отдельно [6]. Детектирование основано на представлении дорожного полотна параметрическими уравнениями прямых линий. Параметры этого уравнения образуют фазовое пространство. На исходный спутниковый снимок накладывается детектор границ Canny. Затем для каждой точки определяется вес границы в этой точке. В случае превышения веса порогового значения аккумулятор рассматриваемого значения увеличивается на вычисленное значение уравнения прямой. После обработки всех пикселей изображения путем поиска локального максимума в пространстве значений аккумулятора определяются параметры наиболее подходящих прямых, которые маркируются на снимке как дороги. Этот метод работает не медленнее других алгоритмов, однако у него есть недостатки. Он накладывает дополнительные ограничения на обрабатываемые им спутниковые снимки: наличие инфракрасного канала, высокое качество съемки и т.д. Ожесточение дорожного полотна крупными объектами препятствует его детектированию.

Алгоритмы, базирующиеся на аппарате нечетких логик, обрабатывают каждый пиксель снимка отдельно. Такие методы состоят из двух алгоритмов: алгоритма определения вероятности принадлежности каждого пикселя дороги на основе его пространственного расположения относительно ранее обработанных пикселей и алгоритма, основанного на цветовых свойствах самого пикселя. Методы, основанные на аппарате нечетких логик, качественно

детектируют дорожное полотно на космических снимках сельской местности или шоссе и в то же время в условиях города [3] ложно детектируют как дорожное полотно многие близлежащие объекты: здания, дорожные знаки, деревья и т.п. Рассматриваемые методы могут быть успешно использованы для обнаружения дорожного покрытия за пределами города, однако показывают недостаточную точность детектирования в городских условиях [7].

Методы, основанные на применении *искусственных нейронных сетей* (ИНС), обладают высокой адаптивностью, самоорганизацией и могут учитывать контекст обрабатываемого пикселя. Таким образом, помимо цветовых характеристик самого пикселя, в полной мере может быть учтено его расположение относительно других пикселей изображения. Это позволяет задействовать больше информационных каналов, работая с каждым в отдельности, к тому же учитывается контекст каналов пикселя – значения цветовых каналов соседних пикселей изображения. Метод основан на машинном обучении, то есть подстраивается под ранее известные входные данные.

В статье рассматривается использование ИНС – многослойного персептрона для задачи автоматического извлечения дорожного покрытия на спутниковых снимках сверхвысокого пространственного разрешения. Объектом данного исследования стала городская дорожная сеть. Необходимость исследования обусловлена тем, что создание, актуализация и обновление карт улично-дорожной сети часто осуществляются вручную [1, 4, 5]. Автоматизация данных процессов позволяет сократить затраты на решение этих задач.

## Архитектура ИНС

С точки зрения архитектуры ИНС – структура обработки информации, состоящая из большого количества тесно взаимосвязанных элементов обработки информации, согласованно решающих определенную задачу. ИНС конфигурируются для применения в конкретной области, например, в области распознавания образов или классификации данных, с помощью процедуры обучения. Для ИНС процедура обучения заключается в корректировке синаптических связей между нейронами.

Простейший вычислительный элемент, из которого состоит ИНС, – нейрон. Нейрон принимает сигналы, обрабатывает их посредством передаточной и активационной функций и вы-

дает сигнал либо ИНС как результат работы, либо следующему слою нейронов (рис. 1). Многослойный персептрон представляет собой многослойную структуру нейронов с полностью связанным соединением двух соседних слоев. Структура многослойного персептрона характеризуется наличием нескольких типов нейронных слоев: входной, скрытый и выходной для получения, обработки и вывода сигналов соответственно.

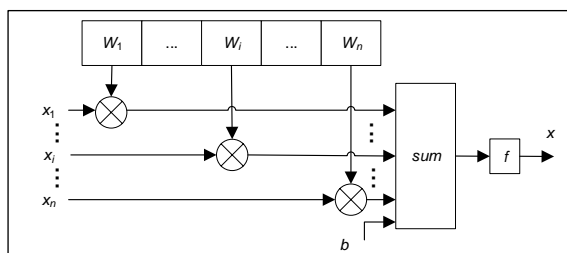


Рис. 1. Схема работы нейрона многослойного персептрона с передаточной функцией  $f$

Fig. 1. Operation scheme for a multilayer perceptron neuron with a transfer function  $f$

Детектирование дорожного полотна на спутниковом снимке может быть интерпретировано как процесс классификации, при котором каждый пиксель маркируется либо как дорога, либо как фон. Множество научных исследований показали, что ИНС может классифицировать различные данные цифровых изображений [1, 4, 5]. При использовании ИНС для детектирования дорог входной слой состоит из нейронов, количество которых соответствует количеству входных параметров, а выходной – из одного нейрона, состояние которого отображает, принадлежит ли рассматриваемый пиксель дорожному полотну или нет. Как правило, одного скрытого слоя достаточно, однако оптимальное количество нейронов в скрытом слое трудно определить и устанавливается многими исследованиями эмпирически [5]. Увеличение числа нейронов влияет на способность ИНС выполнять обобщение, однако увеличивает время обучения и прохождения сигналов через нее [7].

В качестве ИНС для извлечения дорожного полотна в данном исследовании используется многослойный персептрон. В этой ИНС каждый нейрон в скрытом слое вычисляет сумму входных сигналов  $x_i$ , взвешенных соответствующими значениями весовых коэффициентов  $w_{ij}$ , и выходной сигнал  $y_j$  как функцию активации от вычисленной суммы:

$$y_j^t = f \left( \sum_{i=0}^n w_{ji} y_i^{t-1} \right),$$

где  $f(\cdot)$  – функция активации (в данной работе нелинейная сигмоидальная);  $y_i^{t-1}$  –  $i$ -й сигнал от  $(t-1)$ -го слоя;  $w_{ji}$  –  $i$ -е весовое значение  $j$ -го нейрона;  $y_j^t$  –  $j$ -й сигнал  $t$ -го слоя. Функция активации может быть сигмоидальной, пороговой, радиально-базисной или гиперболическим тангенсом.

### Генерация данных для обучения, обучение ИНС

Каждый пиксель входного изображения обрабатывается отдельно. Сам пиксель и все соседние с ним пиксели формируют  $3 \times 3$  матрицу интенсивности в каждом цветовом канале по отдельности [8]. Выходом нейронной сети является один сигнал – либо 0, либо 1: относится ли текущий пиксель к дорожному покрытию или нет. Таким образом, на вход ИНС поступают 27 числовых значений от 0 до 255. Были рассмотрены 20 спутниковых снимков для большого охвата различных вариантов цветности дорожного полотна, его расположения, цветности фона и других характеристик космических снимков и дорожного полотна.

Цветовые каналы RGB принимают целые значения в диапазоне от 0 до 255 и требуют нормализации. После нормализации эти значения находятся в диапазоне вещественных чисел от 0 до 1. Нормализация происходит по следующей формуле:  $N(s_i) = \frac{s_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}$ , где  $s_i$  –

входное значение  $i$ -го сигнала;  $N(s_i)$  – нормализованное значение  $i$ -го сигнала;  $S_{\min}$ ,  $S_{\max}$  – минимальное и максимальное значения входного сигнала (0 и 255 соответственно).

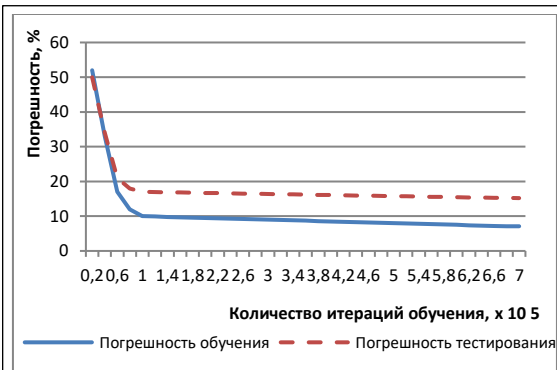
Количество нейронов в сети влияет на ее неустойчивость [9]. Неустойчивость сети характеризует зависимость качества ее работы от первичных значений весовых коэффициентов до процедуры обучения [10]. Исследование проводилось для различных конфигураций ИНС и ее параметров. Количество нейронов на скрытых слоях персептрона влияет на возможность сети вовлечь в работу больший объем данных. Результаты исследования получились приблизительно равными для различных конфигураций.

**Точность детектирования в зависимости от параметров ИНС**  
**Detection accuracy depending on from the ANN parameters**

| Характеристика                        | Значение |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент скорости обучения, $\eta$ | 0,3      | 0,4  | 0,3  | 0,3  | 0,3  | 0,2  |
| Коэффициент инерциальности, $\alpha$  | 0,9      | 0,9  | 0,9  | 0,9  | 0,9  | 0,9  |
| Число нейронов в скрытом слое         | 20       | 20   | 15   | 12   | 10   | 12   |
| Точность детектирования, %            | 76,3     | 70,1 | 80,9 | 86,4 | 80,6 | 71,2 |

Исходя из таблицы, можно сделать вывод, что характеристики качественной работы ИНС достигают максимальных значений при 12 нейронах на скрытом слое, коэффициенте скорости обучения ( $\eta$ ), равном 0,3.

В качестве метода обучения был выбран метод обратного распространения ошибки с заданными параметрами обучения: коэффициентом скорости обучения  $\eta$  и коэффициентом инерциальности  $\alpha$ . В качестве функции активации использовалась сигмоидальная функция. Условиями завершения явились максимальное число итераций обучения 100 000 и максимальная ошибка обучения 0,0001. Наилучшая точность тестирования составила 86,4 % (рис. 2) при использовании следующих параметров ИНС: коэффициент скорости обучения – 0,3, коэффициент инерциальности – 0,9, количество нейронов в скрытом слое – 12.



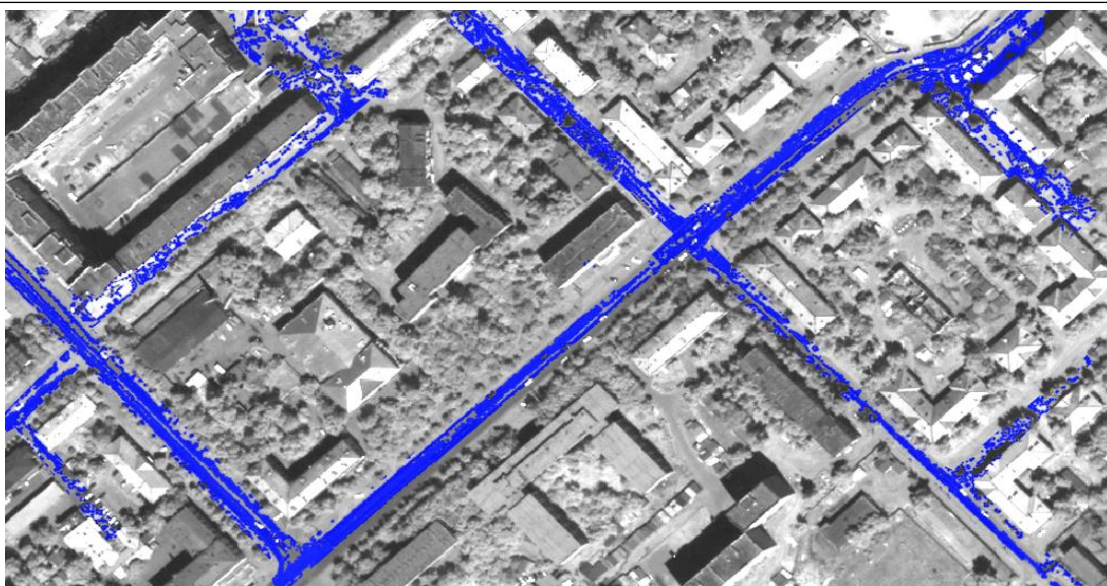
*Рис. 2. График зависимости погрешности обучения и тестирования от количества проведенных итераций*

*Fig. 2. The training error dependency graph and testing depending on the number of iterations performed*

Результат извлечения дорожного покрытия для спутникового снимка города Хабаровска представлен на рисунке 3. Извлеченное дорожное полотно отмечено на рисунке синим цветом. Метод извлек почти все дорожное полотно улично-дорожной сети.

**Заключение**

Целью данной работы были разработка метода автоматического детектирования дорожного полотна на космических снимках и оценка эффективности его применения. Метод осно-



*Рис. 3. Спутниковый снимок с извлеченным дорожным покрытием*

*Fig. 3. Satellite image with the extracted road surface*

ван на использовании многослойного перцептрона в качестве классификатора каждого пикселя исходного снимка.

В ходе оценки эффективности рассматриваемого метода максимальная точность обнару-

жения дорожного полотна на снимке достигла 86,4 %. Алгоритм был протестирован для двух спутниковых снимков. Он показал свою применимость для обнаружения дорожного полотна на космических снимках.

### Литература

1. Тормозов В.С. Метод детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 6. С. 18–24. DOI: 10.25791/asu.06.2019.678.
2. Василенко К.А. Особенности облачных технологий хранения данных // Синергия наук. 2018. № 25. С. 745–748.
3. Yang J., Wang R. Classified road detection from satellite images based on perceptual organization. *Int. J. Remote Sensing*, 2007, vol. 28, pp. 4653–4669.
4. Тормозов В.С. Улучшение работы алгоритма детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках путем сокращения области поиска с использованием геоинформации о дорогах // Вестн. РосНОУ. 2019. № 2. С. 56–63. DOI: 10.25586/RNU.V9187.19.02.P.056.
5. Montasinos P., Alquier L. Perceptual organization of thin networks with active contour functions applied to medial and aerial images. *Proc. 13th Intern. Conf. on Pattern Recognition*, 1996, vol. 1, pp. 647–651.
6. Batista P.A., Prati R.C., Monard M.C. A Study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 2004, vol. 6, iss. 1, pp. 20–29. DOI: 10.1145/1007730.1007735.
7. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Тормозов В.С. Методика подсчета транспортных средств с использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения // Вестн. ТОГУ. 2017. Т. 45. № 2. С. 13–20.
8. Шошина К.В. Система мониторинга и исследования лесных дорог // Вестн. САФУ. 2013. № 4. С. 50–54.
9. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М., 2004. 184 с.
10. Bacher U., Mayer H. Automatic road extraction from multispectral high resolution satellite images. *P&RS*, 2005, vol. 36, pt. 3, pp. 29–34.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348

Received 30.01.20  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 343–348

### Setting up and training a multilayer perceptron for the problem of highlighting the road surface in the city space images

*V.S. Tormozov*<sup>1</sup>, Senior Lecturer, 007465@pnu.edu.ru

*K.A. Vasilenko*<sup>2</sup>, Lecturer, k2857@mail.ru

*A.L. Zolkin*<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Lecturer, alzolkin@list.ru

<sup>1</sup> Pacific National University, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

<sup>2</sup> College of Service and Design at Vladivostok University of Economics and Service (VGUES), Vladivostok, 690092, Russian Federation

<sup>3</sup> Samara branch "Volga State University of the Water Transport", Samara, 443099, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the neural network model application for a multi-layer perceptron to identifying road surface region problems on the urban environment satellite images. Government agencies and enterprises involved in regulating transport flows currently need to solve this problem, as well as to update geographical data and maps of transport infrastructure. In existing works on this topic, there are automatic and semi-automatic methods. Approaches that involve a person's partial involvement in their work are semi-automatic. The operator can set thresholds, setting parameters, mark regions for detection, and do many other operations. Automatic methods work without human involvement and therefore faster and cheaper than semi-automatic ones.

The paper examines and explores a method that uses a multilayer neural network to automatically highlight the road surface on the Earth's surface cosmic images. In its paper, the method is based on a limited sample of roadway previously noted examples. The model has a multilayer perceptron foundation. The input values for the method in question are satellite survey data in the RGB color model. This makes it possible to use more information channels individually. This also takes into account the pixel channel context: values of the image adjacent pixel color channels.

The method in question is relevant, as the expansion of street road network and urban development are changing and should be reflected in the mapping data. The results of the method were with the location of the road surface of the city's road network.

**Keywords:** digital image processing, artificial intelligence, machine learning, image recognition, roadway detection, street road network, artificial neural network, satellite images.

### References

1. Tormozov V.S. Method of detecting and classifying vehicles on ultra-high resolution satellite images. *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2019, no. 6, pp. 18–24. DOI: 10.25791/asu.06.2019.678.f (in Russ.).
2. Vasilenko K.A. Features of cloud storage technologies. *Synergy J.*, 2018, no. 25, pp. 745–748 (in Russ.).
3. Yang J., Wang R. Classified road detection from satellite images based on perceptual organization. *Int. J. Remote Sensing*, 2007, vol. 28, pp. 4653–4669.
4. Tormozov V.S. Improving the operation of the detection and classification of vehicles on satellite images by reducing the search area using geo-information about roads. *Vestn. RosNOU*, 2019, no. 2, pp. 56–63. DOI: 10.25586/RNU.V9187.19.02.P.056 (in Russ.).
5. Montasinos P., Alquier L. Perceptual organization of thin networks with active contour functions applied to medial and aerial images. *Proc. 13th Intern. Conf. on Pattern Recognition*, 1996, vol. 1, pp. 647–651.
6. Batista P.A., Prati R.C., Monard M.C. A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 2004, vol. 6, iss. 1, pp. 20–29. DOI: 10.1145/1007730.1007735.
7. Pugachev I.N., Markelov G.Ya., Tormozov V.S. Methods for counting vehicles using ultra-high spatial resolution satellite imagery. *Bull. PNU*, 2017, vol. 45, no. 2, pp. 13–20 (in Russ.).
8. Shoshina K.V. A system for monitoring and forest road research. *Bull. NArFU*, 2013, no. 4, pp. 50–54 (in Russ.).
9. Labutina I.A. *Decoding Aerospace Images*. Moscow, 2004, 184 p. (in Russ.).
10. Bacher U., Mayer H. Automatic road extraction from multispectral high-resolution satellite images. *P&RS*, 2005, vol. 36, pt. 3, pp. 29–34.

### Для цитирования

Тормозов В.С., Василенко К.А., Золкин А.А. Настройка и обучение многослойного перцептрона для задачи выделения дорожного покрытия на космических снимках города // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 343–348. DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348.

### For citation

Tormozov V.S., Vasilenko K.A., Zolkin A.L. Setting up and training a multilayer perceptron for the problem of highlighting the road surface in the city space images. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 343–348 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348.

УДК 519.17  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.349-356

Дата подачи статьи: 06.12.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 349–356

## **Сравнительный анализ алгоритмов выявления сообществ в сложных сетевых системах на примере социальных сетей**

*А.А. Кочкаров*<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент департамента анализа данных,  
принятия решений и финансовых технологий, [akochkar@gmail.com](mailto:akochkar@gmail.com)  
*Н.В. Калашников*<sup>1</sup>, соискатель, [nikita\\_007\\_94@mail.ru](mailto:nikita_007_94@mail.ru)  
*Р.А. Кочкаров*<sup>1</sup>, к.э.н., доцент департамента анализа данных,  
принятия решений и финансовых технологий, [rasul\\_kochkarov@mail.ru](mailto:rasul_kochkarov@mail.ru)

<sup>1</sup> Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, 125993, Россия

В работе рассматривается задача выделения сообществ в социальных сетях. Для исследования социальных сетей используется графовый подход. Проведен сравнительный анализ базовых алгоритмов и предложенного авторами агрегированного алгоритма.

Для тестирования алгоритмов первоначально были сгенерированы графы с разным уровнем зашумления и заданным числом сообществ. Для сравнения разбиений на графах использовались две известные метрики – Normalized Mutual Information (NMI) и split join distance, каждая из которых обладает своими преимуществами.

Для верификации базовых алгоритмов проведен анализ эгографов социальной сети Facebook на наличие в них сообществ, а также апробирован агрегированный алгоритм MetaClust, показавший высокую результативность по сравнению с базовыми. Значения модулярности для его разбиений (в среднем) выше по сравнению с базовыми алгоритмами. О качестве алгоритма также можно судить по отсутствию у распределения модулярности «хвоста». Средние результаты, показанные алгоритмами на сгенерированных графах, соответствуют результатам применения на эгосетях.

Для генерации модельных данных представляется целесообразным применять предфрактальные графы и шире использовать класс динамических графов. Последовательность сгенерированных графов сообществ соответствует траектории динамического графа, сообщества представляют собой затравки и блоки, а зашумление – добавление новых ребер разного ранга между затравками.

На следующем этапе предполагается осуществить формальное описание зашумления графов в терминологии класса динамических и предфрактальных графов. Использование класса предфрактальных графов позволит вычислять структурные характеристики и свойства графов и сообществ в них.

**Ключевые слова:** социальные сети, сообщества, базовые алгоритмы, агрегированный алгоритм, динамический граф.

Исследованием социальных данных активно занимаются научные группы из ведущих университетов мира – Оксфорд, Стенфорд, MIT. Транснациональные компании, владеющие социальными сетями, такими как Facebook и Youtube, инвестируют в разработку технологий обработки и анализа больших объемов пользовательских данных. Исследовательские центры по всему миру используют данные социальных сетей для моделирования социальных, экономических, политических и других процессов от персонального до государственного уровня с целью разработки механизмов воздействия на эти процессы, а также создания инновационных аналитических и бизнес-приложений и сервисов.

В данной работе рассматривается одна из актуальных задач анализа социальных сетей – вы-

деление сообществ. Наличие сообществ является характерной особенностью социальных сетей, и выделение структуры сообществ позволяет исследовать такие проблемы, как обнаружение преступных групп, выявление ботов пропагандистов, сегментация пользователей для увеличения эффективности контекстной рекламы, рекомендательных систем и многие другие.

Вместе с тем при работе с социальными данными следует принять во внимание такие факторы, как нестабильность качества пользовательского контента (спам и ложные аккаунты), проблемы с обеспечением приватности личных данных пользователей при хранении и обработке, а также частые обновления пользовательской модели и функционала. Все это требует постоянного совершенствования алгоритмов решения различных аналитических задач.

В работе проводится сравнение известных алгоритмов выделения сообществ. Для этого используются графы, сгенерированные по модели *l*-partition [1], а также эгографы пользователей социальной сети Facebook, размещенные на платформе kaggle (<https://www.kaggle.com/c/learning-social-circles/data>). В роли метрик качества алгоритмов выступают показатели *Normalized Mutual Information* (NMI) и *split join distance* [2–4].

### Сравнение разбиений на графах

Во многих известных алгоритмах для оценки качества разбиения используется мера модулярности, которая отражает, насколько структура сообществ в искомом графе отличается от структуры сообществ (насколько выразительны эти сообщества) в случайном графе с равным количеством вершин и распределением их степеней. Мера интуитивно понятная, и, как показывают эксперименты, ее оптимизация действительно приводит к выявлению структуры сообществ в сетях.

Однако бывают случаи, когда известна принадлежность вершин графа к тому или иному сообществу подобному тому, как в задаче обучения с учителем известна метка каждого объекта. Поэтому применяется показатель, отражающий сходство двух разбиений на графе. Получив значения этого показателя и разметку вершин графа, предполагается выяснить, какое из разбиений, предложенных разными алгоритмами, больше похоже на искомое.

*Метрика NMI.* Одной из известных мер сходства двух разбиений является метрика NMI. Эта метрика взята из теории информации и звучит как «если два разбиения похожи, то необходимо немного информации, чтобы восстановить одно из другого». Количество этой информации и интерпретируется как мера расхождения двух разбиений. Мерой сходства является величина  $1 - \text{NMI}$  [5].

Представим результат работы двух алгоритмов по выделению сообществ  $\{x_i\}$  и  $\{y_i\}$ , где  $i$  – номер вершины, а  $x_i, y_i$  – метки, которые выдали алгоритмы вершине  $i$ . Предполагается, что метки  $x$  и  $y$  – это значения случайных величин  $X$  и  $Y$ , для которых задано совместное распределение  $P(X = x, Y = y) = n_{xy}/n$ , где  $n_{xy}$  – количество вершин, таких, что  $x_i = x, y_i = y$ , а  $n$  – общее число вершин в графе. По аналогии определяются распределения  $P(X = x) = n_x/n$  и  $P(Y = y) = n_y/n$ . Тогда информация между распределениями будет определяться следующим

образом:  $I(X, Y) = H(X) - H(X/Y)$ , где  $H(X), H(X/Y)$  – энтропия и условная энтропия:  $H(X) = -\sum_x P(x) \log P(x)$ ,  $H(X/Y) = -\sum_{x,y} P(x, y) \log P(x/y)$ .

В качестве меры непохожести используется нормированная величина NMI:  $I_{norm} = [2I(X, Y)] / [H(X) + H(Y)]$ . Значение  $I_{norm} = 1$  соответствует идентичным разбиениям. В качестве меры сходства двух разбиений далее применяется величина  $1 - I_{norm}$ .

*Метрика split join distance.* Расстояние между разбиениями (*split join distance*) определяет минимально необходимое количество операций для перехода от одного разбиения к другому [6]. Такие операции включают добавление вершины, удаление вершины, создание разбиения с одной вершиной, удаление разбиения с одной вершиной.

### Генерация графов для тестирования модели *l*-partition

Для тестирования алгоритмов выделения сообществ целесообразно использовать графы, в которых присутствуют сообщества. Простой подход – генерация случайного графа с заданными вероятностями появления ребер между любой парой вершин не гарантирует появление сообществ в нем.

Одним из методов генерации случайных графов со структурой сообществ является *l*-partition. Метод генерирует граф с  $n = g * l$  вершин, где  $l$  – количество сообществ;  $g$  – количество вершин в сообществах. Вероятность  $p_{in}$  определяет появление ребра между вершинами одного сообщества;  $p_{out}$  – вероятность появления ребра между вершинами разных сообществ. При  $p_{in} > p_{out}$  плотность связей внутри сообщества выше, чем за его пределами, то есть в графе присутствуют сообщества.

Этому методу генерации графов присущи некоторые недостатки: сгенерированный граф имеет экспоненциальную степень распределения вершин, тогда как реальные сети – степенное распределение [7]; размер сообществ всегда фиксирован, что может внести некое смещение при сравнении качества работы алгоритмов. Для оценки качества алгоритмов на тестовых данных недостаточно одной генерации с заданными параметрами, необходимо провести анализ устойчивости алгоритмов к зашумлению структуры сообществ.

Для зашумления графа применяется следующая процедура: генерируется случайный граф с заданным параметром  $p_{in}$ , далее итеративно добавляются ребра между вершинами из



разных сообществ, регулируя их количество параметром  $p_{out}$ . На каждой итерации значение  $p_{out}$  увеличивается  $p_{step}$ , в данной работе выбран параметр  $p_{out} = 0,01$ . Результатом является последовательность графов с постепенным зашумлением сообществ. На рисунке 1 представлена последовательность графов с сообществами в них, сгенерированных по методу  $l$ -partition. В левом верхнем углу граф с ярко выраженной структурой сообществ, сгенерированных по схеме Гирвана–Ньюмана, вероятность появления ребра между сообществами  $p_{out} = 0,01$ . В правом нижнем углу граф с зашумлением и сложно различимой структурой сообществ с параметром  $p_{out} = 0,45$ .

#### Анализ алгоритмов на модельных данных

Для тестирования алгоритмов с известной структурой сообществ сгенерированы случайные графы по схеме  $l$ -partition с количеством сообществ, равным 4, в каждом по 16 вершин. Вероятность появления ребра в сообществе  $p_{in} = 0,5$ . Начальное значение вероятности появления ребра между вершинами разных сообществ  $p_{out} = 0,01$ . Осуществляется зашумление структуры сообществ в графе до значения  $p_{out} = 0,45$  с шагом 0,01. Последовательность состояний моделируемого графа задана ранее (рис. 1).

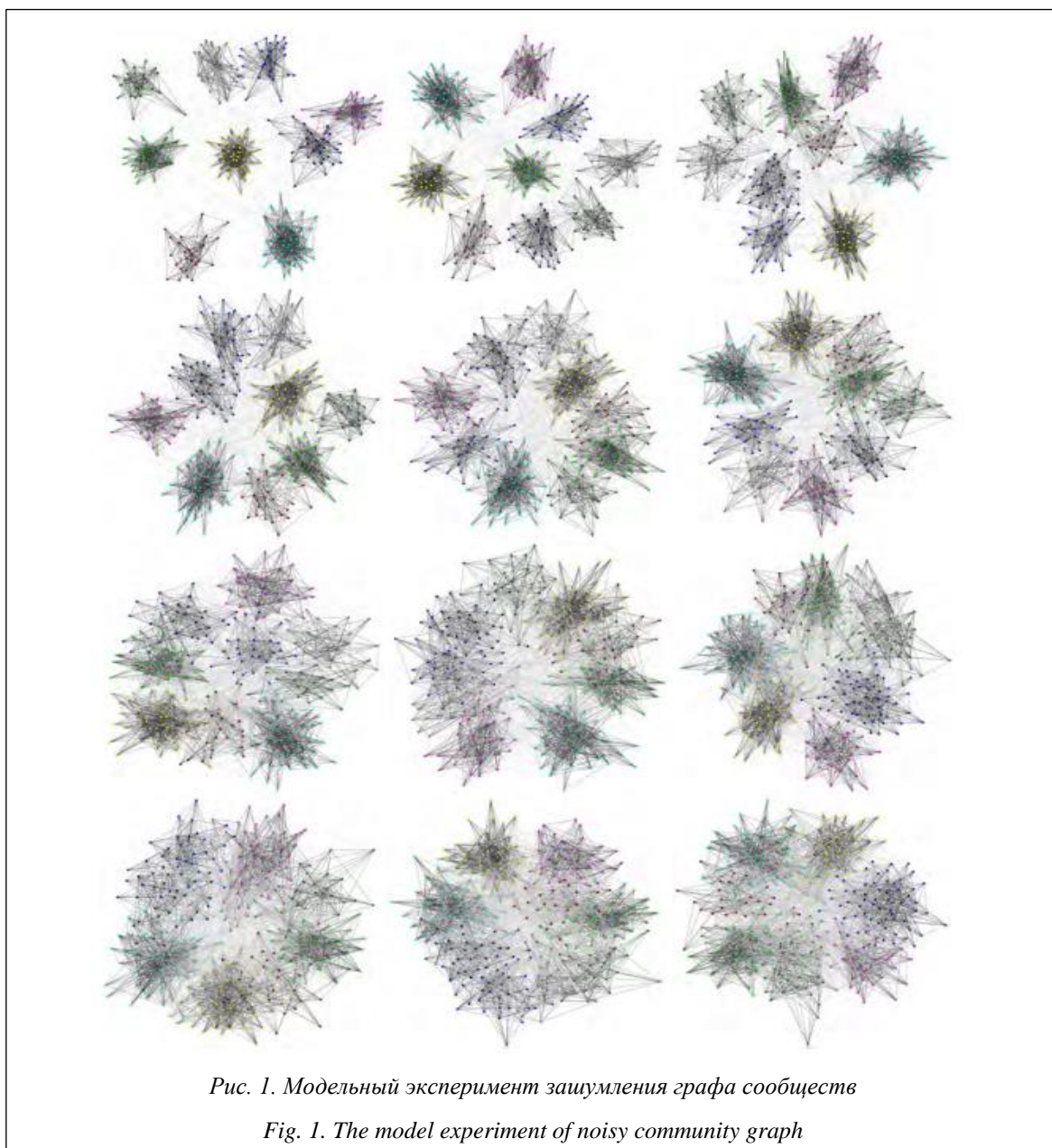


Рис. 1. Модельный эксперимент зашумления графа сообществ

Fig. 1. The model experiment of noisy community graph

Метрики NMI и split join distance показывают оценки качества работы алгоритмов, при этом чем ниже значение метрики, тем выше результативность алгоритма. На рисунках 2 и 3 визуализированы результаты работы алгоритмов.

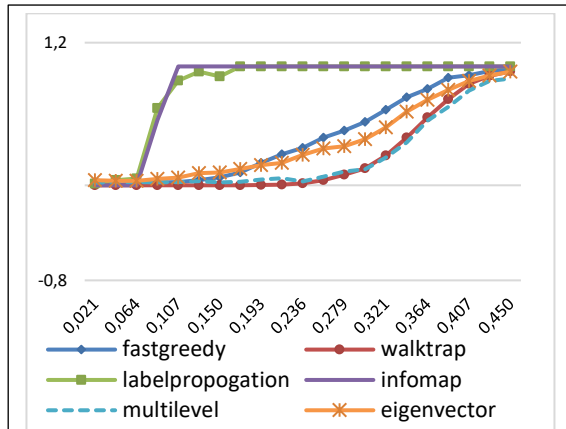


Рис. 2. Результаты работы базовых алгоритмов выделения сообществ на модельных данных. Метрика NMI

Fig. 2. The basic algorithm results for the community allocation on model data. NMI metric

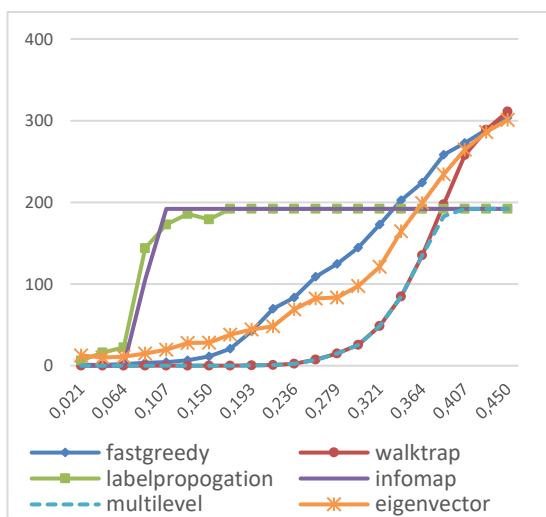


Рис. 3. Результаты работы базовых алгоритмов выделения сообществ на модельных данных. Метрика split join distance

Fig. 3. The basic algorithm results for the community allocation on model data. Split join distance metric

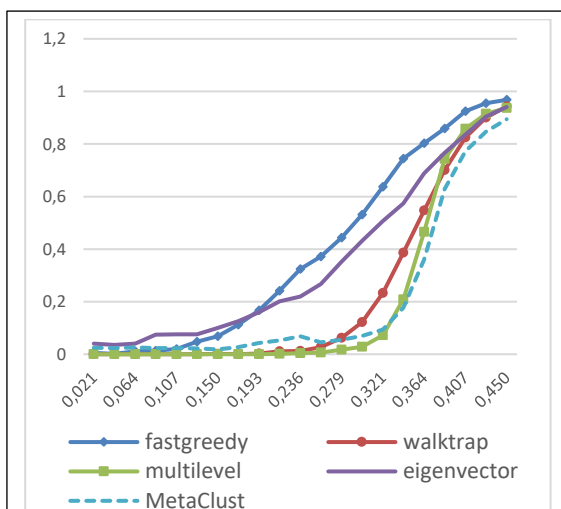
На рисунке 2 алгоритмы Label Propagation и Infomap на уровне зашумления графа  $p_{out} = 0,15$  определяют весь граф как одно сообщество,

о чем свидетельствуют значения метрики NMI, равные единице.

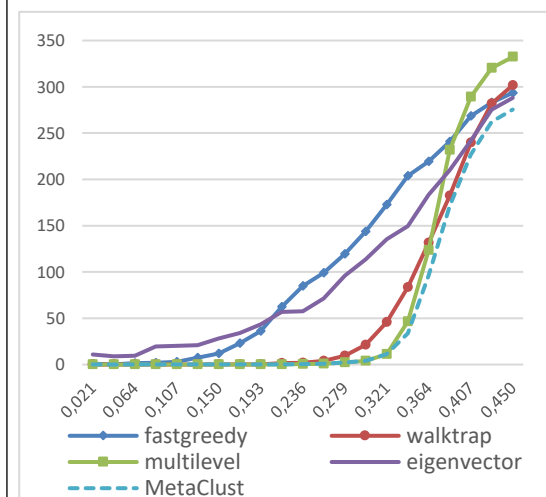
На рисунке 3 алгоритмы Label Propagation и Infomap сходятся к константе, что соответствует определению всего графа как одного сообщества.

Лучше всего с выделением сообществ справились алгоритмы multilevel и walktrap. Следует отметить порог  $p_{out} = 0,25$ , вплоть до которого алгоритмы выдают верные разбиения графа.

На рисунке 4 показаны результаты работы агрегированного алгоритма MetaClust в сравне-



а)



б)

Рис. 4. Результаты работы агрегированного алгоритма MetaClust: а) метрика NMI, б) на модельных данных. Метрика split join distance

Fig. 4. The aggregated MetaClust algorithm results on model data: а) NMI metric, б) split join distance metric

нии с базовыми алгоритмами. Значения кривой метрик заданы пунктирной линией.

Предложенный алгоритм MetaClust по метрике качества split join distance работает не хуже лучшего из базовых алгоритмов на всем отрезке зашумления. Согласно метрике NMI, агрегированный алгоритм справляется хуже методов multilevel и walktrap на отрезке зашумления  $p_{out} \in (0,01;0,30)$ , в то же время превосходя алгоритмы fastgreedy и eigenvector. В момент, когда структура сообществ в графе оказывается сильно зашумленной,  $p_{out} \in (0,30; 0,45)$ , агрегированный алгоритм демонстрирует наилучшее качество работы по обеим метрикам.

Агрегированный алгоритм MetaClust основан на методе кластеризации k-means и требует указания точного количества сообществ в отличие от всех базовых алгоритмов. Этот параметр определяется базовыми алгоритмами и затем используется для агрегированного алгоритма. В настоящей работе агрегированный алгоритм MetaClust состоит из 4 базовых и фактически имеет вычислительную сложность, сопоставимую с суммой этих базовых алгоритмов. Сравнение времени исполнения алгоритмов на модельных данных с зашумлением графа представлено на рисунке 5. Алгоритм multilevel, вычислительная сложность которого зависит практически линейно от количества вершин в графе, показал наилучшие результаты. Алгоритмы walktrap и eigenvector ожидаемо показали меньшую скорость работы в силу квадратичности вычислительной сложности.

### Анализ эгографов социальной сети Facebook

На платформе kaggle.com размещена задача выделения сообществ (Learning social circles in network) на эгографах пользователей Facebook. Эгограф пользователя – это граф, вершинами которого являются друзья пользователя, а ребра отражают наличие дружбы с ними. Помимо эгографов, участникам предоставили анонимизированную социально-демографическую информацию из профилей пользователей. В качестве метрики в этой задаче была использована split join distance, а тестовой выборки – 110 эгосетей пользователей. Эгосети представляют интерес в данной работе для анализа качества работы алгоритмов на них с помощью модулярности.

Далее рассматриваются алгоритмы выделения сообществ в эгосетях пользователей социальной сети Facebook, включая label propagation и infomap, получившие низкие оценки метрик на модельных данных. Результаты работы алгоритмов приведены на рисунке 5. По оси ординат отражено распределение значений модулярностей для каждого алгоритма. Большие значения модулярности соответствуют более качественному выделению сообществ. Прежде всего стоит отметить, что эгосети у рассмотренных 104 пользователей неоднородны и размерность, плотность, зашумление их сообществ сильно отличаются. Об этом можно судить по разбросу значений модулярности, которые достаточно равномерно распределены на отрезке  $[0,2; 0,7]$ .

Методы, которые на модельных данных по мере зашумления графа вырождались в константу, на реальных данных уже не сходились к константе. Тем не менее, оценка качества алгоритмов label propagation и infomap по модулярности также ниже, чем у остальных базовых алгоритмов (на рисунке это отражается в длинных «хвостах» распределений модулярностей). Остальные базовые алгоритмы справились примерно одинаково.

Предложенный алгоритм MetaClust показал высокую результативность по сравнению с базовыми. На рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/7.jpg>) видно, что значения модулярности для его разбиений (в среднем) выше по оси ординат. Также о качестве алгоритма можно судить по отсутствию у распределения модулярности «хвоста».

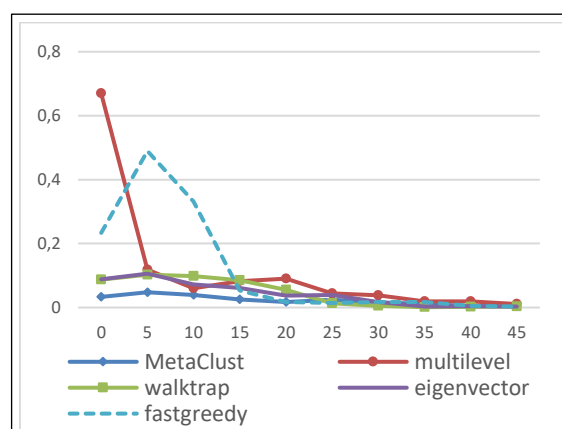
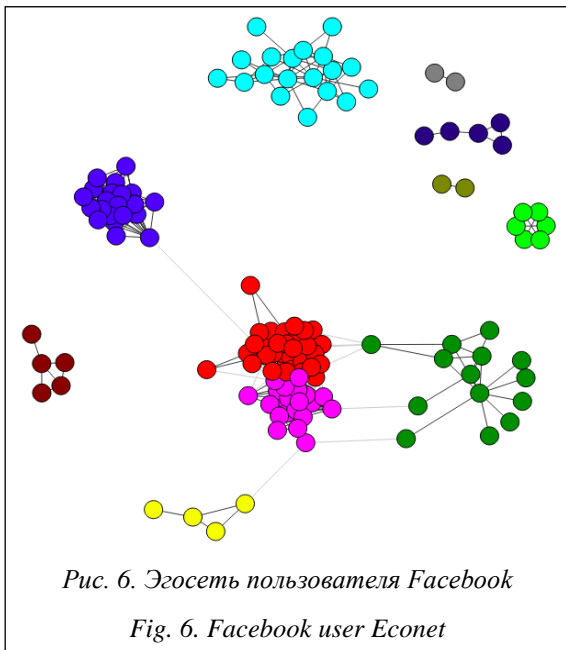


Рис. 5. Время исполнения базовых и агрегированного алгоритмов

Fig. 5. The basic and aggregated algorithm execution time

В исследованных данных лишь один пользователь оказался с ярко выраженной структурой сообществ, все алгоритмы на его эгосети показывают значение модулярности больше 0,8. На рисунке 6 представлена эгосеть этого пользователя с результатом выделения сообществ посредством алгоритма MetaClust. Нужно заметить, что средние результаты, показанные алгоритмами на всей выборке, ранжируются в том же порядке, что и их качество на сети данного пользователя, откуда также заметно преимущество предложенного алгоритма. Разными цветами обозначены разбиение вершин графа на сообщества алгоритмом MetaClust, значение модулярности для алгоритма  $Q = 0,9$ .



Важно понимать, насколько качество агрегированного алгоритма отличается от качества лучшего из базовых. Гистограмма значений разности модулярности для агрегированного метода и лучшего из базовых (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/8.jpg>) показывает, что в большинстве случаев предложенный алгоритм MetaClust качественно выше, о чем можно судить по большей площади функции распределения, находящейся правее нуля.

### Динамические и предфрактальные графы

Любая социальная сеть является подвижным объектом с изменяющейся структурой

связей во времени. Первый этап жизненного цикла социальной сети – рост (набор количества пользователей) и формирование связей между вершинами. На следующем этапе, поскольку количество пользователей ограничено, рост числа вершин замедляется, но при этом активно формируются новые связи – появляются новые ребра, исчезают старые связи – удаляются ребра. Естественно, эти два этапа органично переходят один в другой и распределены во времени, как топологическом, так и реальном.

Для генерации модельных данных представляется целесообразным использовать предфрактальные графы и шире применять класс динамических графов. Последовательность графов сообществ, сгенерированных с помощью метода  $l$ -partition, соответствует траектории динамического графа, сообщества представляют собой затравки и блоки, а зашумление – добавление новых ребер разного ранга между затравками. Следующим этапом видится формальное описание зашумления графов в терминологии класса динамических и предфрактальных графов. Использование класса предфрактальных графов позволит вычислять структурные характеристики и свойства графов и сообществ в них [8–10].

### Заключение

Решение задач в социальных сетях востребовано крупными компаниями, в том числе российскими ИТ-гигантами. Представляется, что интерес к этой проблематике будет только расти в связи с расширением зоны охвата пользователей в социальных сетях и переходом покупателей в виртуальные магазины. В предстоящие 10 лет рынок услуг в социальных сетях может расширяться более чем в 7 раз в соответствии с прогнозом увеличения количества людей, которые получают доступ в глобальную сеть Интернет.

Развитие инструментальной базы моделирования, в частности, использование динамических и предфрактальных графов, позволит расширить круг задач в социальных сетях, в их числе многокритериальные (многопараметрические) задачи, задачи с множественными и нечеткими весами, разработка параллельных алгоритмов, прогнозные задачи с заданным уровнем надежности и многие другие [11, 12].

Вызывает интерес апробация предложенного агрегированного алгоритма на множестве

социальных сетей, а также в смежных областях исследований, где применяются методы выявления сообществ, в частности, в микробиоло-

гии, генетике, транспортно-логистических сетях, структурах распределенных вычислений (блокчейнах).

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-00-01103.*

### Литература

1. Condon A., Karp R.M. Algorithms for Graph partitioning on the planted partition model. LNCS, 1999, vol. 1671, pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-540-48413-4\_23.
2. Azaouzi M., Rhouma D., Ben Romdhane L. Community detection in large-scale social networks: state-of-the-art and future directions. Soc. Netw. Anal. Min., 2019, no. 9. DOI: 10.1007/s13278-019-0566-x.
3. Muhammad A.J., Muhammad S.Y., Siddique L., Junaid Q., Adeel B. Community detection in networks: A multidisciplinary review. J. of Network and Computer Applications, 2018, vol. 108, pp. 87–111. DOI: 10.1016/j.jnca.2018.02.011.
4. Atay Y., Koc I., Babaoglu I., Kodaz H. Community detection from biological and social networks. Appl. Soft Comp., 2017, no. 50, pp. 194–211.
5. Zhang Q., Liu E.Y., Sarkar A., Wang W. Split-order distance for clustering and classification hierarchies. Proc. SSDBM. LNCS, Springer, 2009, vol. 5566, pp. 517–534. DOI: 10.1007/978-3-642-02279-1\_37.
6. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. J., 1948, pp. 379–423.
7. Réka A., Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. Rev. Mod. Phys., 2002, no. 74, pp. 47–97.
8. Perepelitsa V.A., Kochkarov A.M., Sergienko I.V. Recognition of fractal graphs. Cybernetics and Syst. Analysis, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 572–585.
9. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., Малинецкий Г.Г. Некоторые аспекты динамической теории графов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55. № 9. С. 1623–1629. DOI: 10.7868/S0044466915090094.
10. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А. Параллельный алгоритм поиска кратчайшего пути на предфрактальном графе // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. № 6. С. 1157–1162.
11. Биккузина А.И., Жуков А.О., Никольский Ю.В., Буханец Д.И. Подход к решению задачи упорядочения альтернатив в диалоговой системе моделирования принятия решений при информационно-аналитическом обеспечении оценки и прогноза экологического состояния территорий эксплуатации крупных технических комплексов // Новые исследования в разработке техники и технологий. 2014. № 1. С. 33–39.
12. Гладышев А.И., Жуков А.О. Использование в автоматизированной системе контроля полномочий биометрической идентификации // Вестн. Российского нового университета. 2013. № 4. С. 95–98.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.349-356

Received 06.12.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 349–356

### Comparative analysis of community identification algorithms in complex network systems using social networks as an example

**A.A. Kochkarov**<sup>1</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of Department of Data Analysis, Decision Making and Financial Technologies, akochkar@gmail.com

**N.V. Kalashnikov**<sup>1</sup>, Applicant, nikita\_007\_94@mail.ru

**R.A. Kochkarov**<sup>1</sup>, Ph.D. (Economics), Associate Professor of Department of Data Analysis, Decision Making and Financial Technologies, rasul\_kochkarov@mail.ru

<sup>1</sup> Finance University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the identifying community in social networks. There is a graphical approach to the study of social networks. There is a comparative analysis of the basic algorithms and the aggregate algorithm proposed by the authors.

To test the algorithms, the authors generated graphs initially with different noise levels and gave a community number. To compare graph partitions, two well-known metrics the authors used – Normalized Mutual Information (NMI) and Split join distance. Each of the metrics has its own advantages.



To verify the basic algorithms, and analysis the authors made of the Facebook social network geographic for the community presence in them and tested the aggregated MetaClust algorithm. The proposed MetaClust algorithm showed high performance compared to the base ones. The modularity values for its partitions (on average) are higher compared to the basic algorithms. Also, the algorithm quality can be judged by the absence of a “tail” modularity in the distribution. The average results shown by the algorithms on the generated graphs correspond to the application results on the ego networks.

To generate model data, it seems appropriate to use pre-fractal graphs and a wider class of dynamic graphs. The sequence of generated community graphs corresponds to the dynamic graph trajectory, the communities are seeds and blocks, and the noise is the addition of the new edge different ranks between the seeds.

The next step is a formal description of the graphs’ noise in the class terminology of the dynamic and pre fractal graphs. Using the pre fractal graph class will allow us to calculate the structural characteristics and of graph properties and communities in them.

**Keywords:** social networks, communities, basic algorithms, aggregated algorithm, dynamic graph.

**Acknowledgements.** The paper was with the RFBR support, grant no. 18-00-01103.

### References

1. Condon A., Karp R.M. Algorithms for graph partitioning on the planted partition model. *LNCS*, 1999, vol. 1671, pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-540-48413-4\_23.
2. Azaouzi M., Rhouma D., Ben Romdhane L. Community detection in large-scale social networks: state-of-the-art and future directions. *Soc. Netw. Anal. Min.*, 2019, no. 9. DOI: 10.1007/s13278-019-0566-x.
3. Muhammad A.J., Muhammad S.Y., Siddique L., Junaid Q., Adeel B. Community detection in networks: A multidisciplinary review. *J. of Network and Computer Applications*, 2018, vol. 108, pp. 87–111. DOI: 10.1016/j.jnca.2018.02.011.
4. Atay Y., Koc I., Babaoglu I., Kodaz H. Community detection from biological and social networks. *Appl. Soft Comp.*, 2017, no. 50, pp. 194–211.
5. Zhang Q., Liu E.Y., Sarkar A., Wang W. Split-order distance for clustering and classification hierarchies. *Proc. SSDBM. LNCS*, Springer, 2009, vol. 5566, pp. 517–534. DOI: 10.1007/978-3-642-02279-1\_37.
6. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 1948, pp. 379–423.
7. Réka A., Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, no. 74, pp. 47–97.
8. Perepelitsa V.A., Kochkarov A.M., Sergienko I.V. Recognition of fractal graphs. *Cybernetics and Syst. Analysis*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 572–585.
9. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malinetskii G.G. Issues of dynamic graph theory. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2015, vol. 55, no. 9, pp. 1590–1596 (in Russ.). DOI: 10.7868/S0044466915090094.
10. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A. Parallel algorithm for finding the shortest path on a prefractal graph. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2004, vol. 44, no. 6, pp. 1157–1162 (in Russ.).
11. Bikkuzina A.I., Zhukov A.O., Nikolsky Yu.V., Bukhanets D.I. An approach to solving the problem of ordering alternatives in a dialogue system for decision-making modeling with information and analytical support for assessing and predicting the ecological state of the territories of operation of large technical complexes. *New Studies in the Development of Equipment and Technologies*, 2014, no. 1, pp. 33–39 (in Russ.).
12. Gladyshev A.I., Zhukov A.O. The use of biometric identification authority in an automated control system. *Vestn. RosNOU*, 2013, no. 4, pp. 95–98 (in Russ.).

### Для цитирования

Кочкаров А.А., Калашников Н.В., Кочкаров Р.А. Сравнительный анализ алгоритмов выявления сообществ в сложных сетевых системах на примере социальных сетей // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 349–356. DOI: 10.15827/0236-235X.130.349-356.

### For citation

Kochkarov A.A., Kalashnikov N.V., Kochkarov R.A. Comparative analysis of community identification algorithms in complex network systems using social networks as an example. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 349–356 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.349-356.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <b>Борисов В.В., Янукович С.П., Мрочек Т.В., Ореховский Д.С.</b><br>Программный комплекс управления подготовкой IT-специалистов SkillsForYou .....   | 177 |
| <b>Сай Ван Квонг, Щербаков М.В.</b><br>Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0.....  | 186 |
| <b>Овсянникова Е.Е., Ровбо М.А.</b><br>Проблема специализации в иерархических обучающихся системах управления на примере задачи фуражировки.....   | 195 |
| <b>Гуныков С.А., Акимов С.С.</b><br>Разработка программного продукта для построения карты создания ценности .....  | 204 |
| <b>Klimiankou Y.I.</b><br>Trapper: an operating system bootstrapping package for IBM PC compatible computer systems .....  | 210 |
| <b>Баранов А.В., Николаев Д.С.</b><br>Применение машинного обучения для прогнозирования времени выполнения суперкомпьютерных заданий.....  | 218 |
| <b>Татарникова Т.М., Степанов С.Ю., Петров Я.А., Сидоренко А.Ю.</b><br>Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети.....   | 229 |
| <b>Зинченко Л.А., Казаков В.В., Миронов А.А., Дорофеев А.В., Кобылкин С.С.</b><br>Программный модуль автоматизированного расчета параметров экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия..... | 236 |
| <b>Тарачков М.В., Толстель О.В., Калабин А.Л.</b><br>Разработка системы управления педипуляторами антропоморфного робота AP-601M .....   | 243 |
| <b>Кантюков Р.Р., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П., Панарин В.М.</b><br>Система поддержки принятия решений по управлению рисками опасных ситуаций в сложных системах газоснабжения .....  | 250 |
| <b>Шепель И.О.</b><br>Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров .....   | 257 |
| <b>Тумбинская М.В., Асадуллин Н.Ф., Муртазин Р.Р.</b><br>Моделирование аутентификации пользователей по динамике нажатий клавиш в промышленных автоматизированных системах.....   | 266 |
| <b>Гафуров Н.Р.</b><br>Контекстное ранжирование ответов по относительным метрикам в диалоговых системах помощи пользователям .....   | 276 |
| <b>Дударев В.А., Темкин И.О., Корнюшко В.Ф.</b><br>Анализ методов интеграции для разработки информационно-аналитических систем по свойствам неорганических соединений.....   | 283 |

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Плетнев Л.В., Желтов С.А.</b><br>Моделирование столкновения двух атомов над поверхностью<br>конденсированной фазы .....  | 297 |
| <b>Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Воронцов Н.В.</b><br>Подходы к созданию онтологий для автоматизированных систем<br>в машиностроительных производствах.....   | 304 |
| <b>Кантюков Р.Р.</b><br>Архитектура и режимы функционирования системы поддержки принятия решений<br>по диспетчерско-организационному управлению объектами газоснабжения.....                          | 310 |
| <b>Тынченко В.С., Петренко В.Е., Милов А.В.</b><br>Программное обеспечение автоматизированной системы управления<br>электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций .....                         | 319 |
| <b>Баламетов А.Б., Салимова А.К., Гаджиев Н.И., Баламетов Э.А.</b><br>О программном обеспечении для планирования мероприятий<br>по снижению потерь мощности от несимметрии токов в сетях 0,4 кВ ..... | 328 |
| <b>Еремин Е.М., Нагорнов А.В.</b><br>Требования к программной среде автоматизированной<br>обработки полетных данных .....   | 336 |
| <b>Тормозов В.С., Василенко К.А., Золкин А.Л.</b><br>Настройка и обучение многослойного персептрона для задачи выделения<br>дорожного покрытия на космических снимках города.....                     | 343 |
| <b>Кочкаров А.А., Калашников Н.В., Кочкаров Р.А.</b><br>Сравнительный анализ алгоритмов выявления сообществ в сложных сетевых системах<br>на примере социальных сетей.....                            | 349 |



## C O N T E N T

|   |     |
|---|-----|
| <b>Borisov V.V., Yanukovich S.P., Mrochek T.V., Orekhovsky D.S.</b><br>Software complex SkillsForYou for the IT specialists training management .....   | 177 |
| <b>Sai Van Cuong, Shcherbakov M.V.</b><br>Architecture of predictive maintenance system of complex multi-object systems<br>in Industry 4.0 concept .....  | 186 |
| <b>Ovsyannikova E.E., Rovbo M.A.</b><br>The specialization problem in hierarchical learning<br>control systems for the foraging problem .....   | 195 |
| <b>Gunkov S.A., Akimov S.S.</b><br>A software product development for building a value stream map .....   | 204 |
| <b>Klimiankou Y.I.</b><br>Trapper: an operating system bootstrapping package<br>for IBM PC compatible computer systems .....  | 210 |
| <b>Baranov A.V., Nikolaev D.S.</b><br>Machine learning to predict the supercomputer jobs execution time .....   | 218 |
| <b>Tatarnikova T.M., Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A., Sidorenko A.Yu.</b><br>Development of a geoinformation systems protecting method and spatial data<br>based on a neural network .....                                   | 229 |
| <b>Zinchenko L.A., Kazakov V.V., Mironov A.A., Dorofeev A.V., Kobylkin S.S.</b><br>Software module for automated calculation parameters for on-board electronic protection<br>screens radiation protection equipment..... | 236 |
| <b>Tarachkov M.V., Tolstel O.V., Kalabin A.L.</b><br>The pedipulator control system development for anthropomorphic robot AR-601M.....  | 243 |
| <b>Kantuykov R.R., Butusov O.B., Meshalkin V.P., Panarin V.M.</b><br>Decision support system for risk management of dangerous situations<br>in complex gas supply systems .....   | 250 |
| <b>Shepel I.O.</b><br>Modified algorithm for building an occupancy grid from multi-lidar point cloud.....   | 257 |
| <b>Tumbinskaya M.V., Asadullin N.F., Murtazin R.R.</b><br>User authentication based on the keystroke dynamics in the process<br>of using industrial control systems.....  | 266 |
| <b>Gafurov N.R.</b><br>Response contextual ranking on relative metrics in dialogue assistance systems for users .....   | 276 |
| <b>Dudarev V.A., Temkin I.O., Korniyushko V.F.</b><br>Integration methods analysis for the development of information-analytical systems<br>on inorganic substances properties .....                                      | 283 |
| <b>Pletnev L.V., Zheltov S.A.</b><br>Simulation of a collision of two atoms over a condensed phase surface.....   | 297 |

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Burdo G.B., Semenov N.A., Vorontsov N.V.</b><br>Approaches to creating ontologies for automated systems in machine-building industries .....   | 304 |
| <b>Kantyukov R.R.</b><br>Architecture and functioning modes of a decision support system for dispatch<br>and organizational management of gas supply facilities .....                         | 310 |
| <b>Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Milov A.V.</b><br>Software for an automated control system for electron beam welding<br>of thin-walled structures .....                                     | 319 |
| <b>Balametov A.B., Salimova A.K., Gadzhiev N.I., Balametov E.A.</b><br>About software for planning measures to reduce power losses from current asymmetry<br>in 0,4 kV networks.....          | 328 |
| <b>Eremin E.M., Nagornov A.V.</b><br>Requirements for the software environment of automated flight data analysis .....  | 336 |
| <b>Tormozov V.S., Vasilenko K.A., Zolkin A.L.</b><br>Setting up and training a multilayer perceptron for the problem of highlighting<br>the road surface in the city space images.....        | 343 |
| <b>Kochkarov A.A., Kalashnikov N.V., Kochkarov R.A.</b><br>Comparative analysis of community identification algorithms in complex network systems<br>using social networks as an example..... | 349 |

## **НИИ «Центрпрограммсистем» обеспечивает безопасность**

### **Защита от несанкционированного доступа**

Аппаратно-программный комплекс защиты информации «Ребус-М» – получивший высокую оценку специалистов продукт НИИ «Центрпрограммсистем» для защиты информации от несанкционированного доступа при ее хранении и обработке на автономных или объединенных в локальную вычислительную сеть ПЭВМ.

Комплекс «Ребус-М» позволяет разрабатывать и внедрять системы защиты информации для автоматизированных систем военного назначения и обеспечивать выполнение требований по безопасности по классу защищенности до 1Б включительно (обработка информации с грифом до «совершенно секретно»).

Комплекс соответствует требованиям российского законодательства, ФСБ России, нормативных документов Минобороны РФ и других ведомств.

Подробности на сайте [www.rebus-m.ru](http://www.rebus-m.ru)

Телефон в Твери: (4822) 39-91-74

Телефон в Москве: (495) 998-60-05

### **Система обнаружения вторжений**

Программный комплекс обнаружения вторжений «Ребус-СОВ» функционирует на уровне сети и узлов информационной системы с целью обнаружения и блокирования угроз безопасности информации (преднамеренный несанкционированный доступ или специальные воздействия на информацию (носители информации)) со стороны внешних и внутренних нарушителей.

Продукт может использоваться на объектах вычислительной техники как элемент системы защиты информации информационных систем, функционирующих на базе вычислительных сетей и обрабатывающих государственную тайну и конфиденциальную информацию, включая персональные данные.

Программный комплекс «Ребус-СОВ» сертифицирован ФСТЭК России.

Подробности на сайте [www.rebus-sov.ru](http://www.rebus-sov.ru)

Телефон в Твери: (4822) 39-91-74

Телефон в Москве: (495) 998-60-05

## *Вниманию подписчиков*

Международный журнал  
«Программные продукты и системы»  
распространяется по подписке  
в странах СНГ и за их пределами.  
В Каталоге подписных изданий  
Агентства «Роспечать» индекс журнала  
70799

*Телефон (482-2) 39-91-49*

*Факс (482-2) 39-91-00*

[www.swsys.ru](http://www.swsys.ru)  
[red@cps.tver.ru](mailto:red@cps.tver.ru)